



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali

Dottorato di ricerca in: "Innovazione Tecnologica per le Scienze
Agro-Alimentari e Ambientali " XXV ciclo

La modellistica termo fluidodinamica nello
studio dei processi di trasformazione dei
prodotti agro-alimentari

Tesi di Dottorato:

Simone Marai

Matr. n. R08638

Tutor: Dott. Enrico Ferrari

Coordinatore della scuola di dottorato: Prof. Roberto Pretolani

Anno accademico 2011/2012

“Chi ha da dire qualcosa di nuovo e di importante ci tiene a farsi capire. Farà perciò tutto il possibile per scrivere in modo semplice e comprensibile.

Niente è più facile dello scrivere difficile”.

Karl Popper

Sommario

Scopo del lavoro	1
Applicazioni modellistiche alla ricerca	2
Studio modellistico agli elementi finiti della cottura di un prodotto da forno (cottura del biscotto).....	2
Studio dei supporti di appassimento presso l'azienda Masi Agricola S.P.A. (supporti Masi)	4
La precipitazione tartarica nei vini bianchi: la modellazione mediante il metodo agli elementi finiti (precipitazione tartarica).....	6
La trasmissione di calore in una padella di alluminio: studio metodologico agli elementi finiti (padella)	8
Sistemi innovativi in post raccolta per la valorizzazione della filiera frutticola valtellinese (Icepak)	9
Capitolo 1: la simulazione numerica	12
1.1 Che cosa è un modello?.....	12
1.2 Realizzazione del modello	16
1.3 COMSOL MULTIPHYSICS	18
Capitolo 2: rappresentazione semplificata della realtà	21
2.1 Cottura del biscotto	21
2.2 Icepak	24
Capitolo 3: pre-processamento	26
3.1 Decisioni pre-processamento	26
3.1.1 Cottura del biscotto.....	26
3.1.2 Precipitazione tartarica	27
3.2 Geometria.....	27
3.2.1 Supporti Masi	28
3.2.2 Icepak	31
3.3 Caratteristiche fisiche.....	34
3.3.1 Determinazione diffusività biscotto.....	34
3.4 Condizioni al contorno	36
3.4.1 Cottura del biscotto: Umidità assoluta dell'aria e conduttanza convettiva	36
3.5 Mesh.....	38
3.5.1 Cottura del biscotto: Discretizzazione del dominio	38
3.5.2 Cottura del biscotto: Grid independence study	39
Capitolo 4: solutore	41
4.1 Funzione lineare	41
4.2 Funzione non lineare	42
4.2.1 Damping	46
4.2.2 Carichi progressivi.....	47
4.2.3 Non linearità progressiva.....	48
4.3 Simulazioni transitorie	49

Capitolo 5: post-processamento	53
5.1 Padella.....	53
5.2 La cassetta DoppioFondo Masi	54
5.3 Cottura del biscotto	56
5.4 Precipitazione tartarica.....	57
Capitolo 6: risultati e validazione del modello.....	59
6.1 Biscotto	59
6.1.1 Trasferimento materia.....	59
6.1.2 Trasferimento di calore.....	60
6.1.3 Fluidodinamica	61
6.2 Supporti Masi.....	62
6.2.1 Fluidodinamica	62
6.3 Precipitazione tartarica.....	63
6.3.1 Reaction engineeting	63
6.3.2 Trasferimento di calore.....	64
6.3.3 Fluidodinamica	65
6.4 Padella.....	67
6.4.1 Trasferimento di calore: problemi relativi alla matrice alimentare	67
6.5 Icepack	71
6.5.1 Trasferimento di calore.....	71
Capitolo 7: ottimizzazione.....	74
7.1 Supporti Masi.....	74
7.2 Precipitazione tartarica e particle tracing	77
7.3 Icepack	80
Pubblicazioni	82
MODELLING OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER PHENOMENA DURING DRY BISCUIT BAKING BY USING FINITE ELEMENT METHOD.....	83
POST HARVEST COLD CHAIN OPTIMIZATION OF LITTLE FRUITS	106

Scopo del lavoro

La parte che deve, e vuole, essere enfatizzata da questa tesi di dottorato è che la modellistica non è semplicemente imparare ad utilizzare un software, che, pur essendo estremamente complesso (si parla di oltre 10000 pagine di manuali), sicuramente non prepara al mondo della ricerca.

I modelli quindi non sono un semplice inserimento di dati fisici all'interno di un software che li utilizza per fornire un risultato, o meglio, pur essendo così, è determinante la qualità dei dati immessi ed essa si ottiene con metodi di ricerca rigorosi, messi a punto ad hoc per ogni esperienza.

Ed è questo che fa sì che lo sviluppo di un modello porti allo sviluppo e all'apprendimento di tecniche di ricerca nuove, affrontando ogni giorno sfide differenti, attraverso approcci diversi dai classici procedimenti, in modo da ampliare continuamente il bagaglio culturale personale e inserendo una metodologia innovativa e dal sicuro successo accanto a metodiche oramai consolidate.

Questa tesi di dottorato è organizzata seguendo lo schema logico utilizzato per impostare uno studio modellistico, partendo dall'osservazione della realtà da simulare fino ad arrivare alla soluzione, con relativa validazione e successiva ottimizzazione del processo. Nei capitoli vengono messe in evidenza le parti concettuali più interessanti delle differenti esperienze affrontate in questi tre anni, al fine di presentare una serie di problematiche relative a queste ricerche e in che modo esse sono state risolte.

Applicazioni modellistiche alla ricerca

Studio modellistico agli elementi finiti della cottura di un prodotto da forno (cottura del biscotto)

La cottura dei biscotti è un processo complesso (Fahloul et al 1994;. Mundt e Wedzicha 2007;. Sablani et al 1998), poiché l'impasto passa attraverso diverse trasformazioni, fisiche, chimiche e biochimiche prima che possa essere definito un prodotto da forno, di struttura rigida e fragile, con un'elevata resistenza allo sforzo di taglio e con particolari caratteristiche sensoriali. Durante la cottura, l'energia termica viene trasferita alla superficie del prodotto per irraggiamento dalle pareti del forno in cui avviene la cottura e per convezione dall'aria calda all'interno della camera di cottura (Baik et al 1999; Shibukawa et al 1989) ed infine, un trasferimento di calore di tipo conduttivo all'interno del prodotto dalla superficie verso il centro (Mirade et al 2004). (Figura 1)

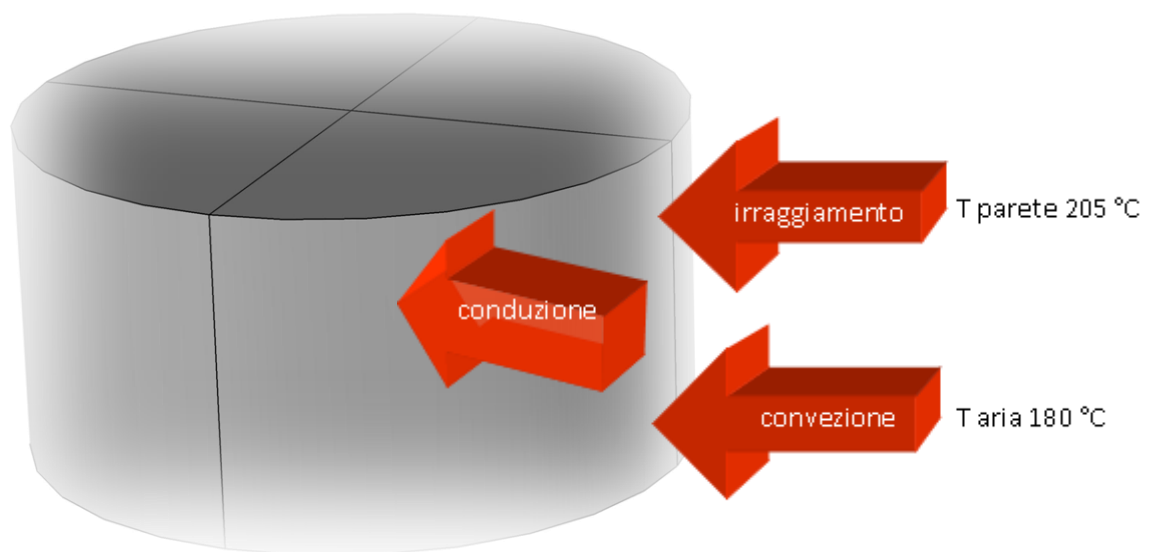


Figura 1: rappresentazione dei trasferimenti di calore

Il principale ostacolo nella modellazione della cottura, sia dal punto di vista fenomenologico che matematico, è associato al non uniforme regime di riscaldamento e, di conseguenza, con le modificazioni fisiche, chimiche e strutturali non uniformi a influenzare significativamente la proprietà termo-fisiche del sistema (Ozilgen e Heil 1994). La trasformazione più rilevante che avviene durante la cottura è il trasferimento di umidità dall'impasto alla camera di cottura a causa dell'evaporazione. Le proprietà termo-fisiche sono strettamente correlate alla composizione della matrice, quindi la continua perdita di umidità durante la cottura fa sì che anche le caratteristiche debbano essere continuamente modificate in funzione di questo parametro. La disidratazione è accoppiata a un aumento del volume dovuto alla pressione esercitata dall'espansione dei gas presenti. Questa espansione del volume è limitata dal termo indurimento del reticolo glutinico. Infine, si ha la formazione della crosta, ad una temperatura superiore a 110 °C e a una umidità inferiore al 2.5%, che rallenta l'evaporazione dell'acqua dalla superficie (effetto barriera) e dà l'attesa doratura della superficie esterna. (Ameur et al 2007;. Chevalier et al 2002;. Mirade et al 2004. Ozilgen e Heil 1994; Purlis e Salvadori, 2009;. Sakin et al 2007 (a); Sakin et al 2007 (b),. Savoye et al 1992;. Thorvaldsson e Skjoldebrand 1998; Thorvaldsson e Jenestad 1999, Zhou e Therdthai, 2007). La formazione della crosta cambia ancora le caratteristiche termo-fisiche della matrice, questa volta non in maniera continua come nel caso della perdita di umidità o della variazione di temperatura, ma in maniera repentina, facendo crollare i valori della conducibilità termica e della diffusività.

La modellazione della cottura è ancor oggi un argomento aperto di ricerca, con studi che vanno dalla reologia a concetti di trasferimento di calore e di massa nell'ingegneria alimentare (Bikard et al. 2012, Ferrari et al, 2012, Nicolas et al, 2012, Feyissa et al., 2011, Purlis, 2011).

L'approccio a questa simulazione molto complessa per via di differenti fenomeni accoppiati è stato graduale, immaginando, come primo step, che ci si trovi di fronte semplicemente ad un trasferimento simultaneo di calore e umidità. Per fare ciò anche la matrice è stata scelta in maniera da limitare altre trasformazioni, quindi il prodotto da forno scelto è il biscotto di pastafrolla. La sua ricetta priva di lieviti e di agenti chimici lievitanti, fa sì che il cambiamento di volume dovuto alla formazione di gas sia teoricamente limitata. Sperimentalmente è stato verificato che ciò non è vero: il vapore acqueo generato dall'evaporazione della umidità presente è sufficiente per aumentare di circa il 50% l'altezza iniziale del biscotto. Questa trasformazione non prevista non viene per il momento considerata nel modello, ma sarà interesse di ricerche future. L'assenza di lieviti, fa sì che la struttura interna del biscotto abbia una alveolatura piuttosto regolare, senza la presenza di grosse bolle, in maniera tale che si possa ipotizzare una struttura continua all'interno del biscotto. La presenza di zone a grande discontinuità cambierebbe il tipo di approccio e quindi anche le equazioni che si è ipotizzato potessero simulare i trasferimenti. La strutturazione interna non omogenea, oltre a complicare l'approccio alla simulazione, è anche difficilmente rappresentabile geometricamente, in quanto le dimensioni e la posizione delle bolle sono impossibili da determinare a priori.

La validazione è stata effettuata, per quanto riguarda la temperatura, per mezzo di termocoppie poste a tre altezze differenti sull'asse centrale all'interno dell'impasto, mentre per quanto riguarda la diffusione dell'acqua all'interno del prodotto da forno è stata misurata l'umidità di settori del biscotto a tempi differenti.

Studio dei supporti di appassimento presso l'azienda Masi Agricola S.P.A. (supporti Masi)

La ricerca ha come obiettivo quello di analizzare l'effetto dei supporti e dei materiali che li costituiscono sul processo di appassimento delle uve.

Lo studio vuole arrivare a caratterizzare i supporti sia dal punto di vista dei materiali ma anche dal punto di vista fenomenologico sul processo correlando, per quanto possibile, l'effetto della struttura con le prestazioni di processo (qualità finale dell'uva, variabilità delle grandezze tecnologiche, ecc.)

In processi ormai consolidati proprio la maggiore conoscenza di alcuni elementi, a volte ritenuti marginali, può portare ad una ottimizzazione che può avere impatto sulla qualità globale del prodotto finito. (Barbanti et al, 2008)

Partendo da questi presupposti è stato sviluppato un progetto di ricerca suddiviso in tre fasi:

1. Prove sperimentali presso un centro di appassimento

Lo studio ha previsto un'analisi sperimentale condotta presso un centro di appassimento. Questa sperimentazione, effettuata durante i mesi di ottobre, novembre e dicembre 2011, ha previsto di seguire quattro diverse configurazioni di supporti (tabella 1): cassette di legno (A), cassette di plastica (B), arelle di bambù (C) e superplateaux (D) (plastica). Le arelle di bambù sono delle grandi tavole fatte di canne di bambù legate insieme tenute in posizione da un telaio di 4 metri di lunghezza e 2 metri di larghezza. Non sono auto sostenenti e quindi necessitano di una struttura esterna per essere impilate una sulle altre. I superplateaux sono delle cassette di plastica molto rigida di dimensioni 120X80 centimetri, con i lati corti removibili in maniera da rendere possibile il passaggio dell'aria, studiate appositamente per l'appassimento delle uve.

Nella tabella 1 vengono mostrate le immagini delle quattro cassette analizzate.



Tabella 1: supporti per l'appassimento utilizzati dalla Masi Agricola

Il processo è stato monitorato valutando ogni 15 giorni la texture, l'umidità ed il contenuto in solidi solubili delle uve poste sui quattro diversi supporti e le condizioni ambientali (temperatura ed umidità) rilevabili sui supporti stessi. Le prove sono state completate con alcune analisi ottiche che si sono rivelate di estremo interesse.

2. Studio delle caratteristiche di materiali impiegati come supporto durante le fasi di appassimento dell'uva.

Questa fase della ricerca è consistita, in un primo momento, nello studio del processo di appassimento e poi in una sua caratterizzazione. Oltre ai materiali già utilizzati presso l'azienda sono stati identificati dall'azienda stessa altri 3 supporti di materiali differenti che sono stati testati in laboratorio. Si è proceduto, quindi, ad una caratterizzazione dei singoli materiali: per ognuno di essi è stata identificata la struttura, le caratteristiche fisiche e strutturali, la geometria utilizzata per la costruzione dei supporti per l'appassimento delle uve, le caratteristiche di igienicità e una valutazione della operatività intesa come facilità di utilizzo per gli operatori.

Lo studio, pertanto, ha portato ad identificare le caratteristiche del singolo supporto/materiale.

3. Caratterizzazione sperimentale in laboratorio dei supporti per l'appassimento delle uve.

L'obiettivo di questa fase della ricerca è di riprodurre una condizione paragonabile a quella operativa in maniera tale da evidenziare gli aspetti termodinamici e morfologici dei materiali relativamente alle applicazioni previste. La ricerca ha previsto di valutare l'impatto sull'uva e di identificare i parametri più significativi relativi all'uva stessa, con lo scopo di evidenziare le interazioni con i materiali.

In questa terza fase si è provveduto alla realizzazione di un modello per valutare se un flusso di aria proveniente da differenti direzioni potesse assicurare un ricambio dell'aria presente, evitando quindi ristagni con conseguente formazione di microclimi che potessero dar luogo alla formazione di effetti indesiderati, quali la formazione di muffe. La capacità di ogni singolo supporto di poter essere attraversato è stata valutata alla velocità dell'aria presente nelle camere di appassimento. Sono stati considerati differenti aspetti dello stesso problema, dapprima considerando soltanto un singolo supporto e la distribuzione dell'aria che lo lambisce, successivamente la configurazione che più si avvicina alla realtà e cioè quella dell'impilamento e dell'accatastamento di una colonna di supporti l'uno sull'altro. Alcune semplificazioni sono state fatte, in particolar modo sulle geometrie dei supporti, in quanto i gradi di libertà risultano molto elevati considerando tutti i particolari che determinano la geometria dei supporti. Nello specifico, a seguito di un modello sviluppato con una geometria identica a quella reale è stato verificato che alcune caratteristiche delle cassette non influenzavano la fluidodinamica. Questi particolari erano quelli presenti sulle facce della cassetta parallele al flusso di aria, che dunque non sono stati considerati in seguito.

La validazione è stata effettuata per mezzo di un anemometro a filo caldo con 5 misurazioni a differenti profondità del supporto dall'origine del flusso d'aria. Per ottenere un buon numero di dati, indipendenti dalle condizioni momentanee sono state effettuate 7 misurazioni in giornate differenti nell'arco dei 100 giorni di appassimento, con cadenza quindicinale.

La precipitazione tartarica nei vini bianchi: la modellazione mediante il metodo agli elementi finiti (precipitazione tartarica)

La stabilizzazione tartarica dei vini è un problema con il quale si confrontano tutte le cantine, poiché gioca un ruolo molto importante nella presentazione dei vini al consumatore. L'acido tartarico (H_2T), diprotico, si dissocia nelle due forme HT^- (ione tartrato acido o bitartrato) e $T^{=}$ (ione tartrato), in relazione al pH del vino. La presenza, nel mezzo, di cationi come K^+ e Ca^{++} , provoca la formazione dei corrispondenti sali dell'acido tartarico (tartrati), che rispettivamente prendono il nome di bitartrato di potassio (KHT) e tartrato di calcio (CaT). Qualora nel vino si creino le condizioni di sovrassaturazione, basse temperature o cambiamenti della composizione del vino, questi sali precipitano sotto forma di cristalli. Nell'uva questi composti sono presenti in compartimenti separati, ma durante la

pigiatura, per la formazione del mosto, si trovano nella stessa soluzione. L'azione dei lieviti non influenza la concentrazione di nessuno dei composti, dando origine a grandi quantità di bitartrato di potassio (KHT) nel vino ottenuto. La stabilizzazione tartarica in cantina ha in linea di principio lo scopo di evitare ogni successiva formazione cristallina in bottiglia. Si tratta quindi sempre di tecniche di tipo preventivo, messe in opera al fine di rallentare o impedire totalmente ogni ulteriore formazione di precipitati. In generale la solubilità di tutti i sali è fortemente influenzata dalla temperatura e nello specifico la diminuzione della temperatura diminuisce molto la solubilità di questo sale. Ed è questa la soluzione tecnologica che è stata utilizzata fin da tempi remoti. Una volta che è avvenuta la precipitazione con successivi travasi, filtrazioni o centrifugazioni, si ha la limpidezza desiderata nel vino.

Nonostante il fenomeno della precipitazione tartarica fosse già noto all'epoca dei Romani questa fase sta acquisendo solo ora sempre maggiore importanza, soprattutto in un'ottica di risparmio energetico riuscendo ad evitare la formazione di uno strato di deposito che aumenta la resistenza allo scambio termico, e nella ricerca di soluzioni impiantistiche ed operative che portino all'ottenimento di un vino il più stabile possibile.

Il processo di precipitazione viene eseguito in un vaso vinario, un cilindro alto 3 m e di raggio 1.5 m, dalla capacità di 150 hl. Le pareti sono di acciaio inox AISI 304 e sono presenti due fasce con serpentine refrigeranti isolate dall'esterno che diminuiscono la temperatura all'interno del vaso.

Il processo di precipitazione tartarica modellato viene eseguito con la tecnica della refrigerazione senza aggiunta di sali, o altri centri di cristallizzazione, su un vino spumante *Franciacorta*. Va considerato che la sottrazione di calore durante le macro fasi del processo produttivo enologico rappresenta il 99% del totale dell'energia elettrica impiegata (Guidetti R., 2005). La ricerca condotta si pone la finalità di ampliare le conoscenze relative alla fase operativa della stabilizzazione tartarica, spesso condotta in modo artigianale e soggettivo, in modo da renderla oggettiva e maggiormente personalizzabile alle diverse condizioni di esercizio. Il modello evidenzia come cambia il fenomeno variando i parametri di processo e le soluzioni impiantistiche adottate.

Data la complessità del problema è stata seguita una strada operativa divisa in 3 parti fondamentali, considerando alcune necessarie approssimazioni. In particolare tali semplificazioni consistono nell'ipotizzare che il vino abbia le medesime proprietà chimico-fisiche dell'acqua, fatta eccezione per il grado di solubilità del bitartrato di potassio in essa. La solubilità in acqua è infatti pressoché infinita, mentre in soluzioni alcoliche è fortemente influenzata dalla temperatura e dal pH della soluzione. Inoltre non è stato considerato il fenomeno del colloide protettore, concorrente nella reazione, in grado di modificare la cinetica della precipitazione tartarica e di tutte le altre reazioni che avvengono durante il processo. In aggiunta si è ipotizzato che la formazione del deposito di bitartrato di potassio lungo le pareti del vaso vinario avesse un andamento lineare nel tempo, e non dipendente dalla quantità di bitartrato che precipita. Inizialmente è stata simulata un'analisi termica accoppiata alla reazione chimica che porta alla formazione del bitartrato di potassio e della frazione precipitante, in modo da correlare le cinetiche di reazione ai dati provenienti dall'analisi termica.

Dalle informazioni ottenute dall'azienda agricola che ha collaborato per questo progetto (Franca Contea di Adro, BS) è stato osservato che al termine della fase produttiva, della durata di una settimana, effettuata senza utilizzare sistemi di agitazione e senza l'aggiunta di cristalli di tartrato con funzione di centro di cristallizzazione, si ha la formazione di uno strato di bitartrato di potassio di circa 0,5 millimetri di spessore sulle pareti interne del vaso vinario.

Si è ritenuto pertanto opportuno considerare, nel secondo *step* di ricerca, se la presenza di questo deposito influenzasse negativamente lo scambio termico. È stato simulato in questo caso che sulla parete refrigerante si formasse uno spessore di isolante (bitartrato di potassio) dipendente in maniera lineare dal tempo.

Una soluzione ingegneristica adottabile per evitare la precipitazione è di mantenere la soluzione in costante agitazione, in maniera tale che l'energia cinetica delle particelle faccia in modo che queste non possano depositarsi sulle pareti refrigerate o quantomeno che tale deposizione sia rallentata. Pertanto la terza fase è consistita nella trattazione di un'analisi fluidodinamica in tre dimensioni, immaginando di inserire all'interno del vaso vinario un agitatore meccanico continuo al fine di evitare che le particelle di bitartrato precipitate andassero a collidere contro le pareti laterali del contenitore.

La validazione è stata effettuata confrontando i dati ottenuti da una cantina tipo.

La trasmissione di calore in una padella di alluminio: studio metodologico agli elementi finiti (padella)

La cottura degli alimenti è una pratica che si compie da sempre con lo scopo di rendere i cibi più commestibili, digeribili, appetibili e sicuri. In questo senso gli strumenti di cottura hanno giocato e giocano un ruolo importante nelle preparazioni alimentari.

È interessante usare come approccio allo studio di un mezzo di cottura comune, come la padella, il metodo agli elementi finiti, in modo da riuscire ad oggettivare esperienze che nella vita quotidiana risultano essere oramai banali. La presente ricerca ha avuto, quindi, l'obiettivo di sviluppare una metodologia di studio del riscaldamento di un alimento in padella di alluminio con lo scopo di supportare, su basi oggettive, le proposte di possibili ottimizzazioni degli strumenti di cottura.

La ricerca è stata articolata in tre fasi con livello crescente di complessità:

- *fase 1*: Modellazione del riscaldamento di una padella vuota;
- *fase 2*: Modellazione del riscaldamento in padella di un disco di alluminio;
- *fase 3*: Modellazione del riscaldamento in padella di un disco di patata.

L'approccio a step crescenti di complessità sottolinea come un modello in realtà molto semplice (trasferimento di calore) sia reso complesso dalla struttura e dalle caratteristiche non omogenee della matrice.

Considerando i fenomeni che entrano in gioco durante la cottura (l'evaporazione dell'acqua, le reazioni di Maillard, la perdita di vitamine, la denaturazione delle proteine, ecc.) si è pensato di sviluppare un modello base che si potesse rendere progressivamente sempre più sofisticato e più vicino così alle reali criticità del riscaldamento di un alimento in padella. Sono state effettuate delle semplificazioni, soprattutto per quanto riguarda la

terza fase, quella con la matrice alimentare posta a contatto con la padella. Non vengono prese in considerazione la deformazione della patata, che in realtà si è visto sperimentalmente essere importante, e la gelatinizzazione dell'amido.

Si evidenzia ulteriormente ciò che è già stato espresso precedentemente: la qualità dei dati immessi è ciò che valorizza un modello e che fa sì che la simulazione sia coerente con la realtà. Un disco di alluminio, con proprietà termiche note in ogni loro dettaglio, è facilmente modellabile, come vedremo nel prosieguo della presente trattazione. Lo stesso disco, ma stavolta di un materiale alimentare, anche se scelto tra gli altri per notorietà delle proprietà termo-fisiche, non necessariamente porta ad un modello con risultati soddisfacenti e comunque peggiori di quello con il disco in alluminio.

La validazione è stata effettuata per mezzo di termocoppie poste a contatto con le differenti superfici testate (padella, disco di alluminio e disco di patata)

Sistemi innovativi in post raccolta per la valorizzazione della filiera frutticola valtellinese (Icepak)

I piccoli frutti come mirtilli, lamponi e more necessitano di una rapida refrigerazione post-raccolta, per preservarne l'integrità strutturale e le proprietà nutrizionali ed organolettiche. Infatti, con la rimozione del calore di campo, la respirazione di questi frutti diminuisce e quindi la shelf-life del prodotto migliora.

A causa della fragilità di questi frutti la raccolta deve essere effettuata manualmente e la fase di riempimento dei contenitori di trasporto deve essere la più delicata possibile. Tutta la catena di trasporto, dal campo al consumatore, non dovrebbe causare ulteriori danni al prodotto. Il contenitore di plastica (vaschetta) che contiene i frutti usato per la vendita è lo stesso utilizzato durante la raccolta. Questi contenitori di plastica, contenenti circa 250 g di frutta (il cui trasporto singolo è scomodo), sono posti in secondo contenitore più grande, di solito una cassetta di legno, contenente 8 vaschette di plastica.

La refrigerazione può iniziare immediatamente dopo la raccolta in uno speciale contenitore, chiamato Icepak, che sfrutta un sistema di refrigerazione passiva. Questo sistema si basa sulla capacità di un materiale in passaggio di stato di assorbire calore, sottraendolo all'ambiente in cui si trova. L'Icepak è una scatola di polistirolo (dimensione esterna: 42.5 X 33.5 X 12 cm) dotata di un contenitore in PET ermetico riempito di acqua (circa 1 kg) disposta sul fondo (figura 2A e 2B). All'interno dell'Icepak è possibile mettere 8 contenitori in plastica come in una normale cassetta di legno. Lo spessore della parete è di 2 cm e l'altezza del contenitore in PET è di circa 1,8 cm. Il contenitore in PET e il suo contenuto vengono conservati a -20 °C fino al momento dell'utilizzo. Il flusso di calore proveniente dall'esterno viene assorbito dalla fusione del ghiaccio in modo da mantenere la temperatura all'interno della Icepak pressoché costante, a circa 0 °C, per un lungo periodo di tempo. La possibilità di impilare gli Icepak permette di ottimizzare lo spazio occupato e di diminuire le superfici di scambio con l'ambiente esterno (figura 2C).

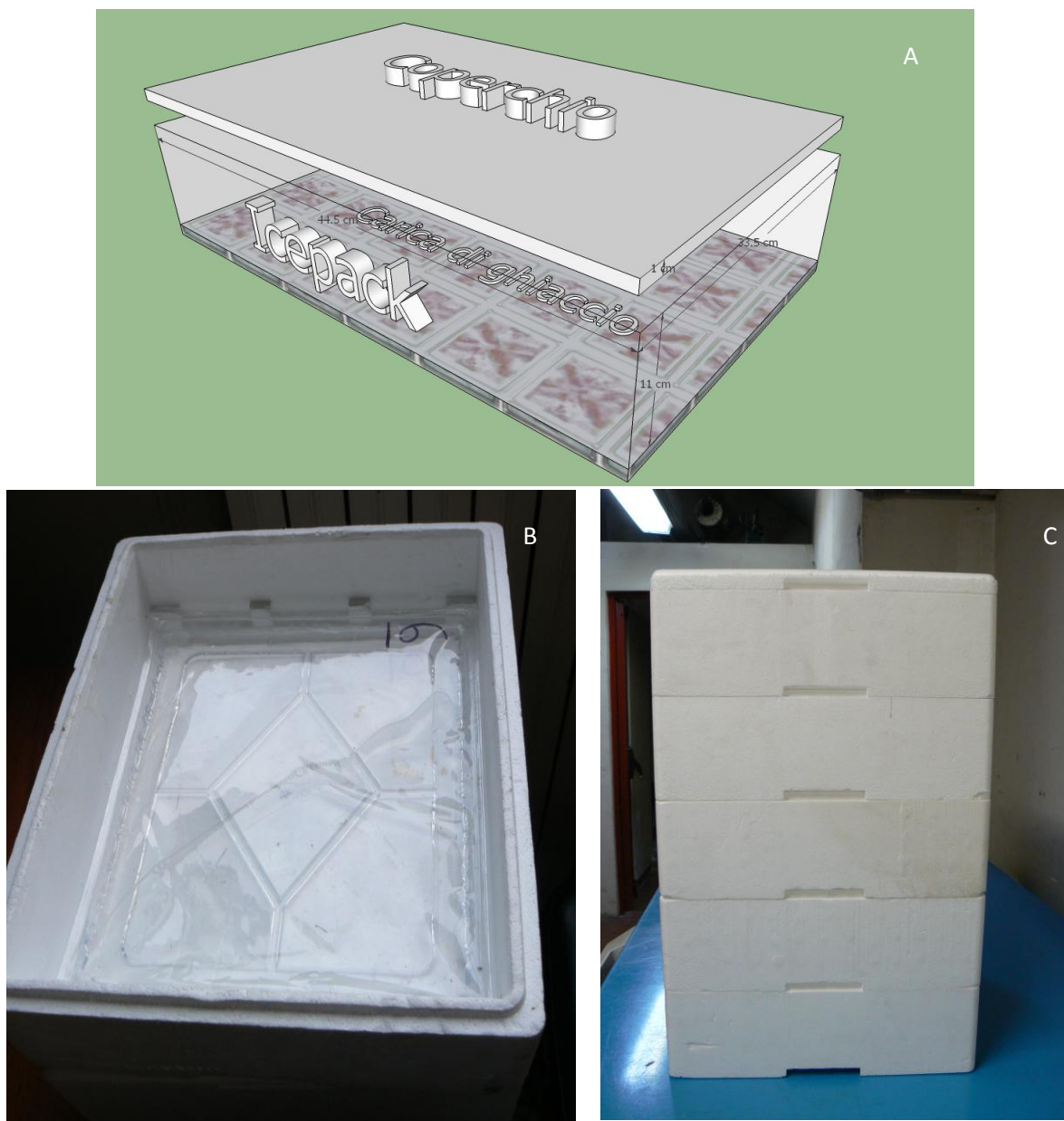


Figura 2: Icepack (A) schema (B) foto con carica di ghiaccio (C) impilamento

La ricerca ha lo scopo di migliorare la qualità dei prodotti (in questo caso mirtilli), soprattutto dei piccoli produttori, quelli cioè che effettuano la raccolta manuale nei propri campi per poi conferire il prodotto nei centri di raccolta consortili, attraverso una corretta gestione delle prime fasi del post-raccolta. L'Icepack viene utilizzato per togliere il calore di campo e per mantenere refrigerati i mirtilli fino alle celle frigorifere del centro consortile. Il tempo che intercorre tra la raccolta dalla pianta e l'arrivo in cella è di circa 6/7 ore (Marai et al, 2012).

La simulazione vera e propria è un semplice trasporto di calore con cambiamento di fase della lastra di acqua ghiacciata. L'aria esterna lambisce la scatola, con un trasporto di calore per convezione, mentre il trasporto avviene per conduzione attraverso la pareti della scatola e poi ancora attraverso l'aria all'interno dell'Icepack (figura 3).

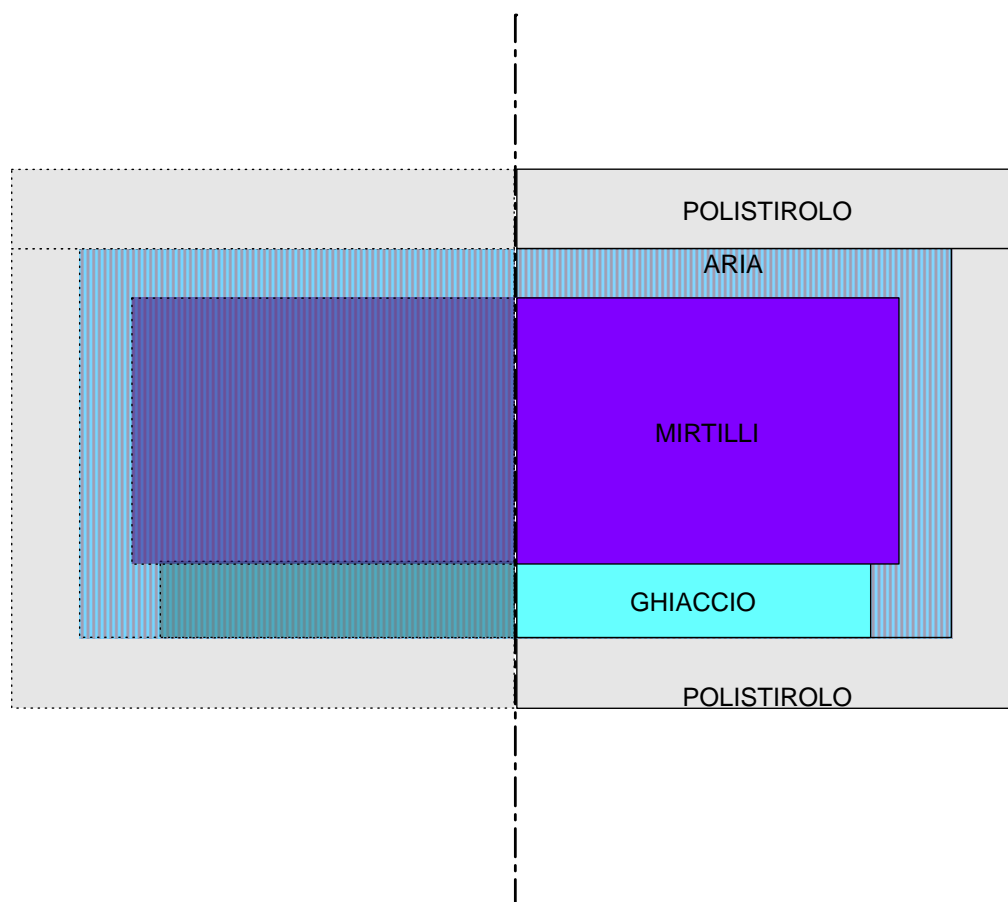


Figura 3: schema di riempimento dell'Icepack

La validazione è stata effettuata per mezzo di termocoppie poste a differenti altezze e in differenti zone all'interno del contenitore vuoto (prove in laboratorio). Per le prove in campo sono stati utilizzati dei datalogger a bottone posti in diverse posizioni e a diverse altezze della scatola piena di mirtilli.

Capitolo 1: la simulazione numerica

1.1 Che cosa è un modello?

Per modello si intende una rappresentazione di un oggetto o di un fenomeno reale che riproduce caratteristiche o comportamenti ritenuti fondamentali per il tipo di studio che si sta svolgendo. È quindi una raffigurazione concettuale (molto spesso semplificata) del mondo concreto o di una sua parte, capace di spiegarne il funzionamento.

Col termine modellazione si vuole indicare quel processo cognitivo che porta alla costruzione di un modello di un sistema fisico o processo reale attraverso l'applicazione dei principi basilari di una teoria, dunque tutte quelle operazioni necessarie per arrivare a definire il modello stesso.

I principi fondamentali della teoria sono definiti attraverso leggi fondamentali (equazioni) che non sempre sono risolvibili in maniera analitica, e per questo si utilizzano tecniche numeriche approssimate.

Il modello numerico che sta alla base della modellazione consiste in una serie di equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono la fisica del problema. Queste equazioni vengono trasformate in un sistema di equazioni algebriche e quindi risolte in maniera numerica su una geometria definita dominio.

Ad esempio se si volesse descrivere una conduzione del calore in regime transitorio all'interno di un cilindro, l'equazione generale che deve essere risolta è:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \right)$$

dove ρ , C_p e k sono le caratteristiche termo-fisiche del materiale, r , z e ϕ le dimensioni del cilindro, T la temperatura e t il tempo. Le caratteristiche termiche del materiale sono in questo caso considerate costanti, ma possono dipendere dalla temperatura o dalla posizione.

Nel caso invece di una fluidodinamica mono-dimensionale stazionaria in un mezzo poroso, la legge di Darcy è definita come:

$$Q_x = - \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

dove k è la permeabilità del mezzo, μ la viscosità dinamica, p la pressione e Q_x la portata del fluido.

Al contrario dei prototipi, o dei progetti pilota, il modello computerizzato ha una serie di vantaggi:

- Una volta che il modello è validato (i risultati ottenuti concordano con quelli sperimentali) è possibile modificare qualsiasi parametro o caratteristica del modello in maniera molto semplice per ottenere condizioni e risultati differenti.
- Le condizioni dell'ambiente esterno possono essere estremizzate, anche oltre quelle ottenibili attraverso prove sperimentali. Ad esempio, è possibile imporre una differenza di potenziale di 10 MV senza correre il rischio di scariche elettriche, o impostare una temperatura di una superficie a 10K, impossibile da raggiungere sperimentalmente.
- Il processo può essere monitorato in grande dettaglio senza perturbare l'ambiente durante le operazioni di misura. Infatti sperimentalmente è spesso impossibile misurare una grandezza senza che la misura modifichi le condizioni della prova, ovvero senza che l'ambiente sia perturbato dalla presenza della strumentazione della misura. Ad esempio la velocità dell'aria in un condotto viene spesso falsata dalla presenza dell'anemometro all'interno del condotto stesso.

Esistono metodologie differenti per risolvere le equazioni differenziali alle derivate parziali, e si possono riassumere in tre grandi categorie: quelle che utilizzano il metodo alle differenze finite, quelle che utilizzano gli elementi finiti e quelle che utilizzano i volumi finiti.

Nel primo caso il dominio spaziale viene diviso in zone e all'interno di ognuna di esse viene identificato un punto, definito nodo, al quale si associa il valore di tutte le variabili in quella zona a un determinato tempo. Una volta definito il valore delle grandezze in tutto il dominio spaziale si procede con il calcolo per lo step temporale successivo. Tale calcolo può essere effettuato con due metodologie differenti, la prima, il metodo esplicito, prevede che i valori di un nodo derivino dai valori dei nodi limitrofi allo stesso tempo e da quelli del nodo stesso al tempo precedente, mentre la seconda, il metodo implicito comporta che la soluzione di tutto il dominio a quello step temporale sia fatta in contemporanea su tutti i nodi. Con il primo metodo lo step temporale utilizzato per la soluzione non può essere grande a piacimento, ma dovrà essere correlato alla divisione del dominio spaziale, cioè deve sottostare alle leggi di stabilità. Ad esempio, se vogliamo analizzare l'evoluzione della temperatura in una struttura monodimensionale con trasmissione del calore di tipo conduttivo, si può dimostrare che la condizione di stabilità è ottenuta per:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{\Delta x^2}{\alpha}$$

dove α è la diffusività termica del materiale.

Se invece si prendono in considerazione anche le condizioni al contorno di tipo convettivo la condizione di stabilità diventa più restrittiva:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{\Delta x^2}{\alpha} \left[\frac{1}{1 + \left(h \frac{\Delta x}{k} \right)} \right]$$

E quindi risulta essere il fattore limitante per gli step temporali.

Il metodo agli elementi finiti (F.E.M.) è una tecnica avanzata di risoluzione di equazioni differenziali parziali che consiste nel discretizzare queste equazioni nelle loro dimensioni spaziali. Il metodo nasce negli anni '50 in parallelo allo sviluppo degli elaboratori elettronici. Trattandosi di una tecnica algoritmica applicabile a qualsiasi sistema che si possa modellare in maniera continua, i campi in cui sono state sviluppate soluzioni con il metodo agli elementi finiti sono molti. Attualmente si contano applicazioni in ingegneria civile per ogni tipo di calcolo strutturale, in geotecnica per la definizione di campi tensionali e verifiche di stabilità, in idraulica per la risoluzione dei moti di filtrazione, in elettrotecnica e in meccanica per una serie di svariate applicazioni relative ai transitori, in ingegneria aerospaziale per lo studio dei profili alari, nella fisica tecnica per lo studio della propagazione del calore, ed in altri campi ancora.

L'uso della modellazione è una componente importante nel processo di progettazione in numerosi settori di studio, soprattutto in campo chimico o meccanico, ed è un fattore chiave nella capacità di produrre o migliorare il prodotto a un costo competitivo e in breve tempo. Sebbene l'applicazione di questo metodo in campo industriale sia di sviluppo relativamente recente, la loro diffusione sta rapidamente aumentando grazie al progressivo aumento delle prestazioni dei processori e al costo sempre più basso di dispositivi hardware di memoria. Anche l'economicità e la semplificazione d'uso di pacchetti software dedicati ha contribuito allo sviluppo di queste tecniche (Fabbri et al. 2012).

La caratteristica fondamentale di questo metodo è la divisione del dominio spaziale di partenza in una serie di elementi di forma elementare (triangoli o quadrilateri bidimensionali, tetraedri o esaedri tridimensionali). Questi elementi sono in numero finito, non sono sovrapposti, e le loro dimensioni, seppur piccole a piacimento, sono finite e non infinitesime (da qui il nome del metodo). A differenza del metodo delle differenze finite, questa divisione del dominio (definita mesh) può essere modificata a piacimento dell'utilizzatore, in modo da avere una mesh più fitta nei punti di maggior interesse o dove l'accuratezza del calcolo lo richieda. Il metodo trasforma le equazioni differenziali alle derivate parziali, definite dalle caratteristiche del materiale e dalle condizioni al contorno, in un sistema di equazioni algebriche. Gli elementi finiti sono interconnessi tra loro nei nodi del sistema. Siccome in corrispondenza di ciascun nodo è possibile scrivere una o più equazioni che governano il problema in esame, risolvere il sistema di equazioni ai nodi equivale a definire il comportamento all'interno degli elementi. Infatti i singoli elementi sono definiti in modo univoco una volta calcolate le grandezze di interesse ai nodi. Le relazioni che legano le condizioni ai nodi con quanto accade all'interno degli elementi sono chiamate funzioni di forma (solitamente lineari, alcune volte polinomiali). L'insieme

dei nodi e degli elementi che descrivono la geometria è quella che viene definita *mesh* (figura 1.1).

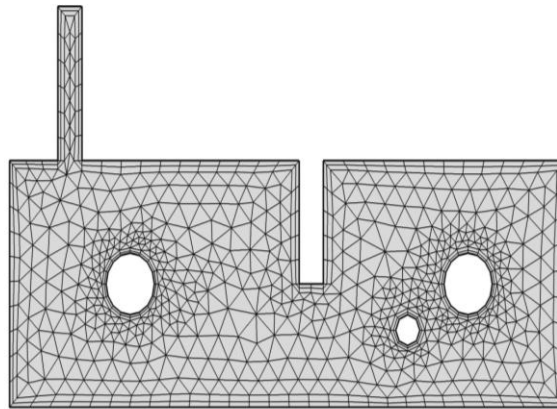


Figura 1.1: esempio di mesh

Nel caso di simulazioni transitorie, oltre allo spazio viene discretizzato il tempo. Anche in questo caso la divisione è in un numero finito di elementi (non di grandezza infinitesima) che può anche avvenire in maniera automatica. In questo caso vengono imposti step temporali in funzione delle equazioni che devono essere risolte. Come per il dominio spaziale, anche in questo caso l'operatore può impostare un time step più piccolo, in maniera da avere più accuratezza nei risultati, perdendo in velocità di risoluzione. Una caratteristica importante del metodo agli elementi finiti è di permettere l'accoppiamento di più problemi tra loro distinti ma interconnessi e risolvibili ciascuno singolarmente tramite un algoritmo con il metodo agli elementi finiti.

Il metodo ai volumi finiti (F.V.M.) è un metodo di discretizzazione utilizzato per la simulazione numerica di leggi di conservazione di vario genere. Molte importanti caratteristiche del metodo ai volumi finiti sono simili a quelle per il metodo agli elementi finiti. Una caratteristica aggiuntiva del metodo ai volumi finiti consiste nel fatto che il flusso numerico viene conservato da una cella (un volume finito) ai suoi vicini. Questa caratteristica rende il metodo ai volumi finiti un metodo molto interessante quando si trattano problemi di modellazione per i quali il flusso è significativo, come ad esempio nella meccanica dei fluidi, nel trasporto di calore o di massa o nelle simulazioni di semiconduttori (Eymard et al, 1997).

Il metodo che è stato utilizzato per la risoluzione approssimata delle equazioni differenziali alle derivate parziali, e che verrà quindi qui descritto, è il metodo agli elementi finiti.

Attualmente uno dei limiti alla diffusione della modellazione a livello industriale in campo alimentare è la necessità di avere del personale specializzato che si occupi della

problematica e non da meno alcune caratteristiche tecniche collegate alla matrice che si vuole analizzare:

- Il materiale biologico è complesso e non è sempre possibile ignorare o trascurare la sua natura non omogenea e non isotropica.
- La maggior parte delle caratteristiche fisiche del materiale (densità, calore specifico, diffusività, composizione chimica, ecc) sono strettamente correlate alla temperatura, alla umidità, allo stato fisico in cui si trovano o comunque ad altre grandezze che cambiano durante i processi in cui sono coinvolti i prodotti alimentari. Ad esempio, l'uovo, sostanzialmente un fluido viscoso a temperatura ambiente, si trasforma in un solido una volta portato ad alta temperatura, e se poi viene raffreddato (quindi ancora una volta a temperatura ambiente) non ritorna alle sue caratteristiche fisiche originarie.
- Le trasformazioni a cui vanno incontro i prodotti sono molto spesso accoppiate tra loro. Ad esempio i materiali biologici subiscono un cambiamento della loro umidità quando esposti alle diverse condizioni esterne. Questo modifica le proprietà termofisiche del materiale e quindi qualsiasi altra trasformazione che questi prodotti subiscono (riscaldamento o raffreddamento, conservazione in atmosfera modificata, immersione in campi fluidodinamici, ecc) sarà correlata a questo cambiamento. Non è detto che l'accoppiamento non sia anche tra più di due trasformazioni fisiche contemporanee.

1.2 Realizzazione del modello

Operativamente, la costruzione di un modello segue lo schema riportato in figura 1.2. Generalmente, nella letteratura internazionale vengono riconosciute soltanto le tre fasi riportate nel riquadro giallo, chiamate *pre-processamento*, *soluzione* o *processamento* e *post-processamento*.

Dovendo descrivere un processo fisico reale, la cosa più importante da fare in via preliminare è quella di capire quali siano le grandezze coinvolte, in che modo si sono modificate e quantificarne le modificazioni, in modo da rendere il modello che si va a realizzare snello, di facile risoluzione, senza perdere però troppo in accuratezza. Per questo motivo ritengo importante inserire anche questa fase nel processo di risoluzione di un modello, e non solo le fasi che operano all'interno del software. Ed è quindi in questa, spesso sottovalutata, primissima fase, che viene chiamata in questo caso *soluzione teorica*, che si prendono decisioni su come dovrà essere fatto il modello, quindi è la più determinante per le caratteristiche della simulazione. Le semplificazioni che vengono apportate si decidono prima della realizzazione del modello, come ad esempio se considerare o meno una caratteristica del materiale o una trasformazione del processo di produzione.

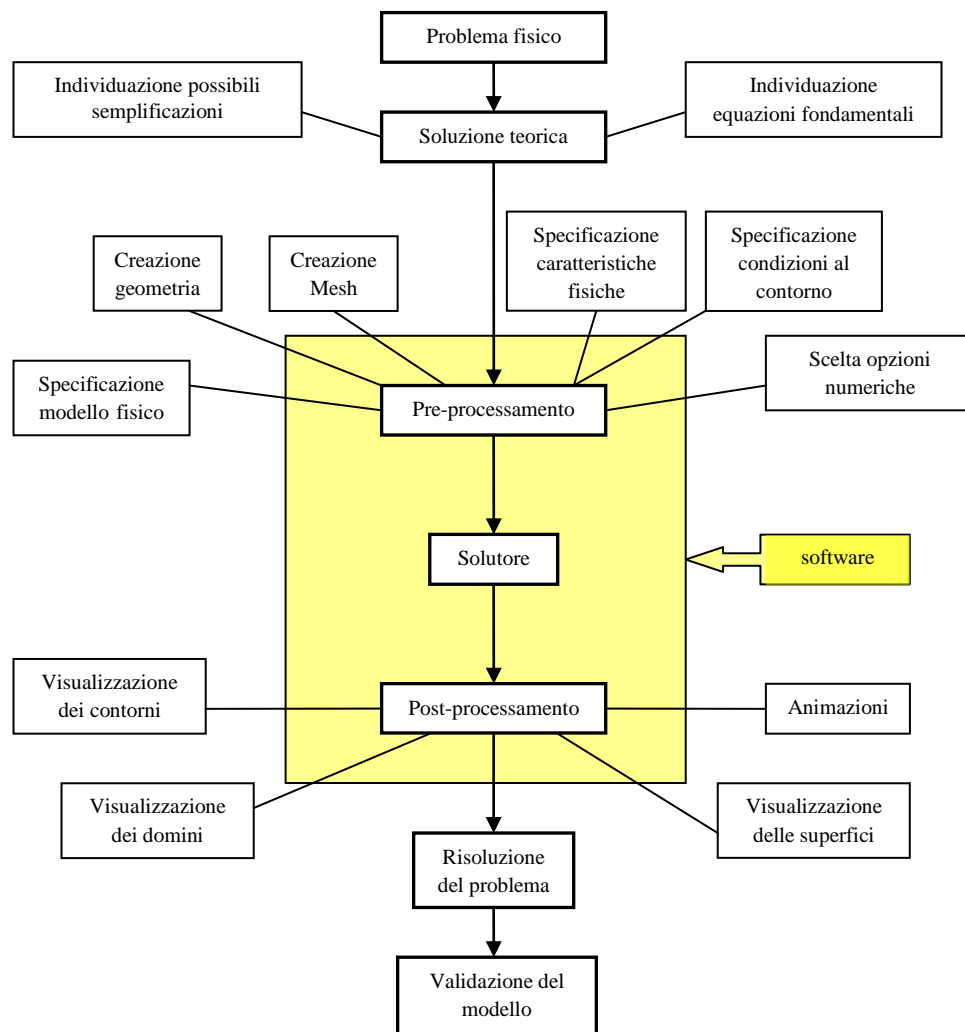


Figura 1.2: diagramma delle fasi di costituzione di un modello

La fase di pre-processamento è la prima fase che avviene all'interno del software; in questa fase, solitamente la più dispendiosa in termini di energia e di tempo, vengono immesse le informazioni relative ai materiali impiegati e alle condizioni al contorno del sistema, quindi le caratteristiche termo fisiche dei materiali e le condizioni a cui si trovano nell'istante iniziale. Inoltre viene definita la divisione del dominio spaziale e nel caso di simulazioni transitorie lo step temporale massimo.

Dopo la determinazione delle equazioni che governano il sistema bisogna definire un metodo di risoluzione che concili i migliori risultati con il minor tempo di elaborazione e sotto accettabili condizioni di stabilità numerica. La scelta è ovviamente influenzata dal tipo di problema da risolvere. Il solutore è quindi il cuore del software, in questa fase vengono risolte le equazioni ed è quella che impegna le maggiori risorse da parte del processore e della memoria.

Nel post-processamento viene visualizzato il campo delle soluzioni: sostanzialmente la rappresentazione delle soluzioni trovate dal solutore. È possibile rappresentare i risultati delle relazioni matematiche risolte, per mezzo di grafici, all'interno della geometria descritta in precedenza con mappe delle grandezze coinvolte, e visualizzare contemporaneamente più grandezze differenti nella stessa geometria utilizzando tipi diversi di plottaggio. Ad esempio in figura 1.3 l'andamento della temperatura lungo una linea della geometria (A), la mappatura della temperatura sulla superficie (B) e la combinazione di questa con il gradiente di temperatura (C).

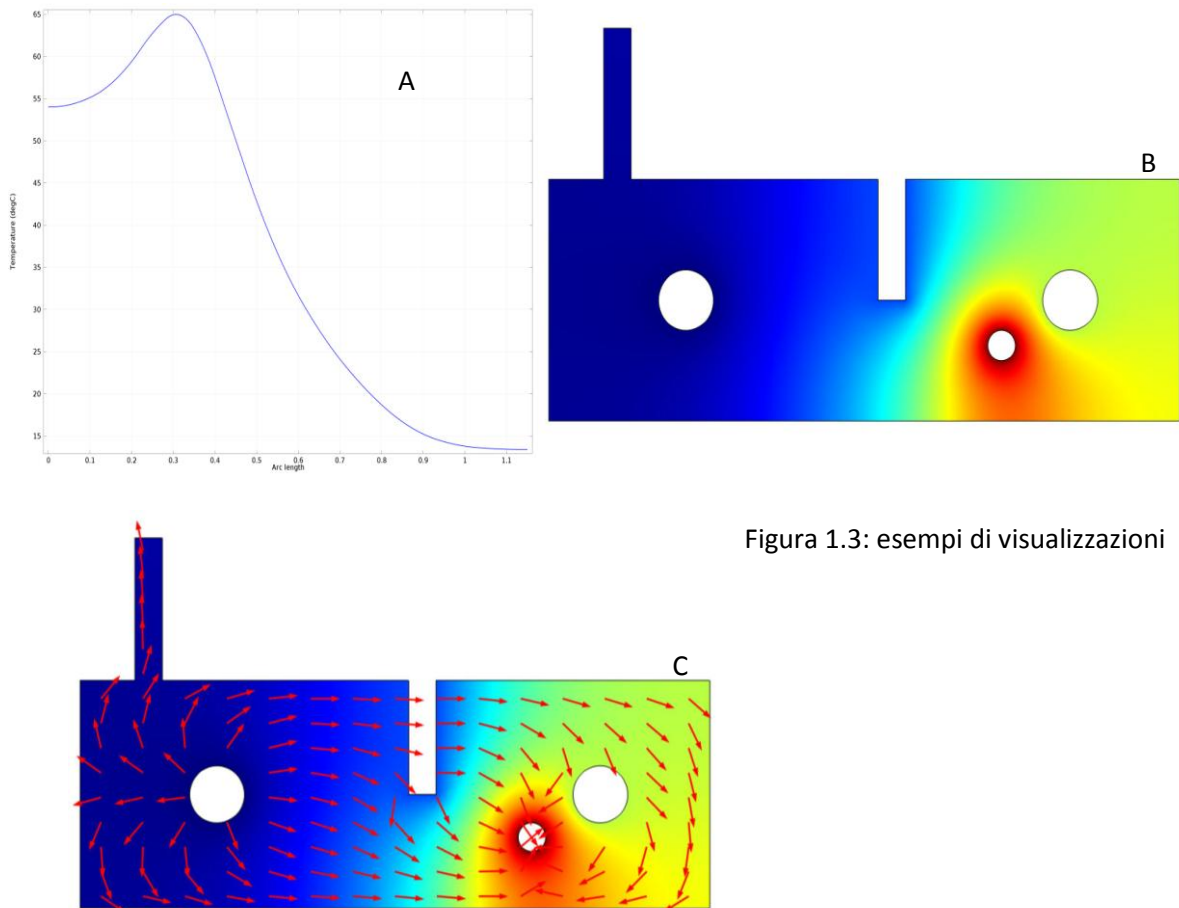


Figura 1.3: esempi di visualizzazioni

1.3 COMSOL MULTIPHYSICS

Le fasi di pre-processamento, processamento e post-processamento della generazione di un modello sono gestite dall'operatore all'interno di un ambiente virtuale, che nel mio caso è COMSOL Multiphysics.

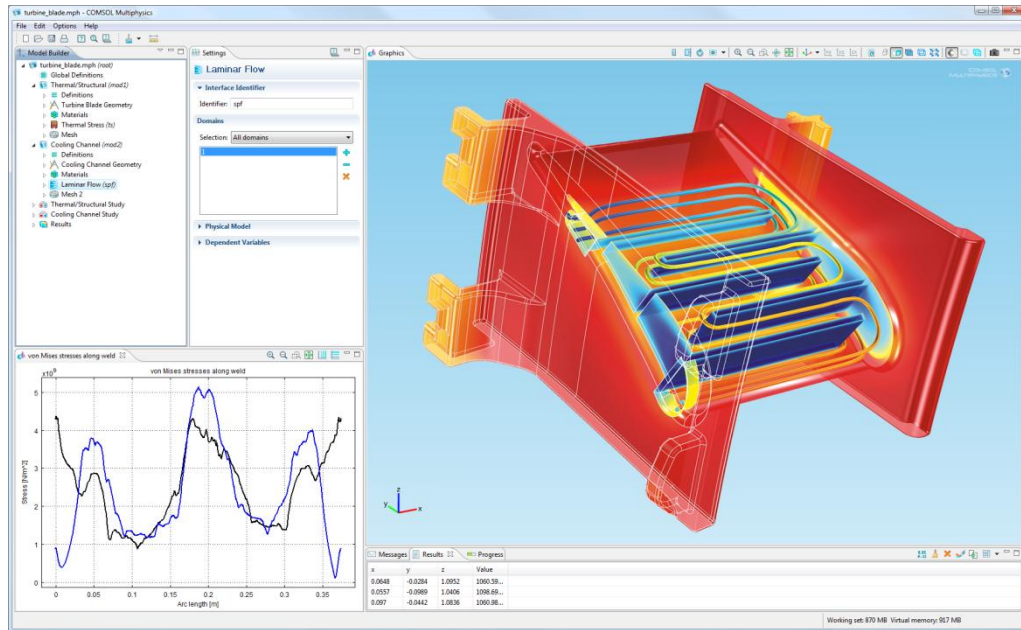


Figura 1.4: esempio di schermata COMSOL

Questo software è realizzato da un'azienda specializzata leader del settore della modellazione e simulazione di ogni sistema che può essere descritto attraverso equazioni differenziali alle derivate parziali. Un suo punto di forza è la capacità di realizzare analisi multi-fisiche potendo così tener conto simultaneamente di più aspetti fisici differenti, al contrario di altri software di simulazione dove le interazioni sono già predeterminate.

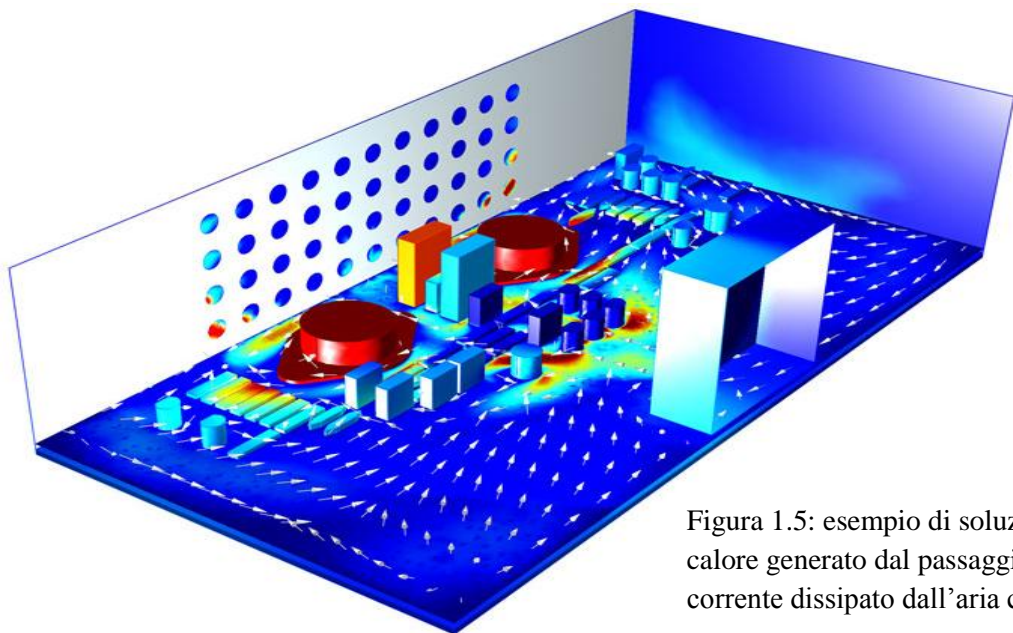


Figura 1.5: esempio di soluzione: il calore generato dal passaggio di corrente dissipato dall'aria circolante

Si possono inoltre utilizzare moduli speciali aggiuntivi che consentono di aumentare gradualmente le potenzialità di calcolo.

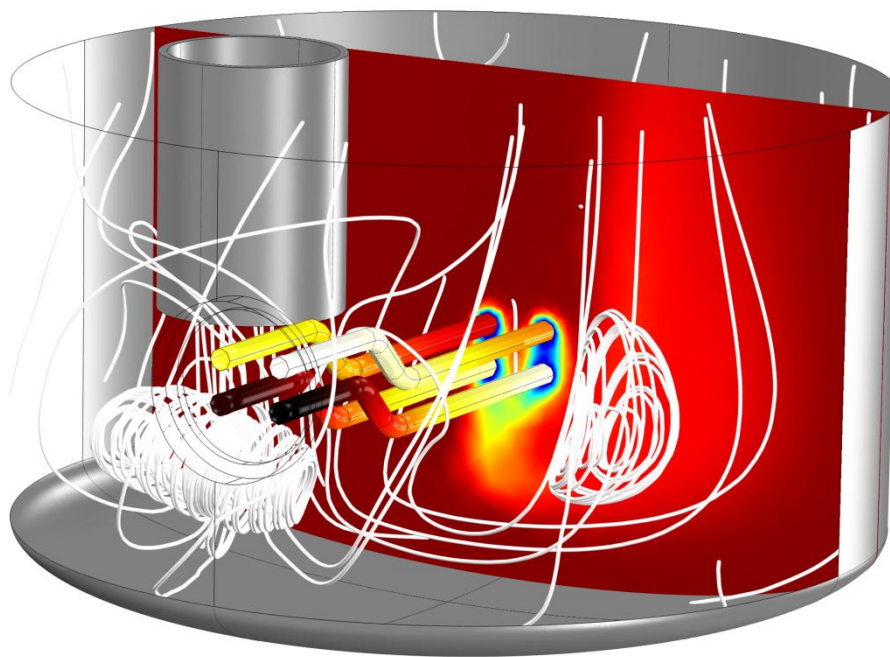


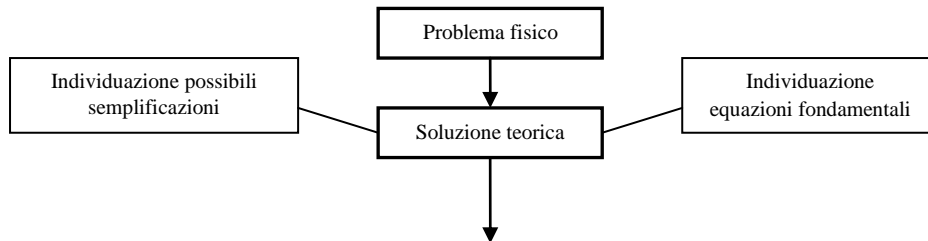
Figura 1.6: esempio di soluzione: distribuzione della temperatura all'interno di un boiler e rimozione del calcare dagli elementi riscaldanti

Il software nasce con il nome FemLab nel 1998, e si occupa inizialmente, come la maggior parte dei software di modellazione numerica, di analisi strutturale. Attraverso release successive si arriva nel 2000 alla realizzazione del 'Elettromagnetic module', nel 2001 al 'Chemical Engineering module', nel 2004 al 'Heat Transfer module' e al 'MEMS module', fino al settembre 2005, dove cambia nome nell'attuale COMSOL Multiphysics, e dove vengono inseriti moduli per l'importazione da software CAD. Da allora le release continuano a susseguirsi, arrivando attualmente a 33 moduli aggiuntivi tra servizi (multipurpose), importazioni (interfacing) e fisiche dedicate (electrical, mechanical, fluid, chemical) (figura 1.7)

COMSOL Multiphysics®						
ELECTRICAL	MECHANICAL	FLUID	CHEMICAL	MULTIPURPOSE	INTERFACING	
AC/DC Module	Heat Transfer Module	CFD Module	Chemical Reaction Engineering Module	Optimization Module®	LiveLink™ for MATLAB®	LiveLink™ for Excel®
RF Module	Structural Mechanics Module	Microfluidics Module	Batteries & Fuel Cells Module	Material Library	CAD Import Module	ECAD Import Module
MEMS Module	Nonlinear Structural Materials Module	Subsurface Flow Module	Electrodeposition Module	Particle Tracing Module	LiveLink™ for SolidWorks®	LiveLink™ for SpaceClaim®
Plasma Module	Geomechanics Module	Pipe Flow Module	Corrosion Module		LiveLink™ for Inventor®	LiveLink™ for AutoCAD®
	Fatigue Module				LiveLink™ for Creo™ Parametric	LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
	Acoustics Module				LiveLink™ for Solid Edge®	File Import for CATIA® V5

Figura 1.7: prodotti COMSOL

Capitolo 2: rappresentazione semplificata della realtà



Come dicevamo precedentemente, questa è la fase più importante e quindi la più delicata di tutta la generazione di un modello. Già da questo punto bisogna avere idea di quale sarà l'obiettivo finale della simulazione.

Come prima cosa bisogna analizzare il processo reale che si vuole simulare, e individuare quali sono le varie operazioni elementari che lo compongono. Dopo di che si eliminano dalla simulazione quelle operazioni che non sono ritenute fondamentali per ottenere un modello predittivo, e che quindi non intervengono o lo fanno in maniera non determinante ai fini del modello (ad esempio se devo cuocere in forno del pane a 180 °C, non mi interessa il poco calore generato dal lievito che si sta sviluppando, mentre potrebbe essere utile capire quanto e in che modo funzioni il cambiamento di volume determinato dalla CO₂ prodotta).

Questa è la fase dove più c'è bisogno dell'esperienza dello sviluppatore, il quale deve far sì che i processi eliminati dalla simulazione bilancino le perdite di accuratezza con la fattibilità del modello, le risorse computazionali a disposizione e il tempo impiegato.

2.1 Cottura del biscotto

Un esempio di come questa fase sia importante è data dall'esperienza che ho sviluppato con la modellazione della cottura di un prodotto da forno (biscotto tipo frollino). Ho dovuto confrontarmi con un processo estremamente complesso, nel quale coesistono numerosissime trasformazioni sia fisiche, che chimiche che biochimiche, e di queste solo alcune sono importanti per lo sviluppo del modello.

Durante la cottura, quindi con l'aumento della temperatura, l'impasto iniziale va incontro a diverse trasformazioni, fisiche, chimiche e biologiche prima di diventare biscotto.

Basti pensare alla reologia di un impasto - malleabile, piuttosto deformabile e che offre una resistenza pressoché nulla al taglio - e quella di un biscotto - indeformabile, fragile e con una consistenza resistente agli sforzi di taglio.

Le trasformazioni che avvengono nell'impasto dipendono dalla quantità di acqua presente e soprattutto dalla temperatura a cui questo si trova.

Durante la fase di impastamento della farina con gli altri ingredienti, si comincia a formare il glutine, dall'unione delle gliadine e glutenine.

Quando l'impasto viene infornato si ha una notevole evaporazione di acqua dalla superficie, la quale riduce l'aumento della temperatura superficiale della pasta malgrado l'elevata temperatura del forno e la buona conducibilità della pasta dovuta alla sua ricchezza in acqua. In questa fase la temperatura all'interno dell'impasto si aggira sui 30 – 40°C, temperatura alla quale i grassi presenti nell'impasto (burro) si possono considerare fusi.

La gelatinizzazione dell'amido fino alla temperatura di 60 °C comporta una idratazione esterna dei granuli.

Fra i 60 e i 70 °C la pasta, sotto la spinta del vapore d'acqua che si forma, aumenta il suo volume, rigonfiamento limitato dalla presenza del reticolo plastico glutinico. Tra gli 80-90°C si ha un rigonfiamento rapido e intenso dovuto alla disgregazione dei siti di amido meno accessibili e con forti legami. In questo momento inizia anche la termo strutturazione del reticolo glutinico, cioè una trasformazione della maglia visco-elastica proteica in una rete rigida.

Si ha contemporaneamente aumento del trasporto di calore verso il centro dell'impasto che porta alla gelificazione dell'amido. Questi eventi portano, a partire da 90°C, alla fine della deformabilità dell'impasto.

Dopo i 90°C si ha la frammentazione dei granuli d'amido fortemente rigonfiati con dissoluzione e diffusione delle molecole lineari (amilosio).

Intorno ai 100°C si ha un'intensa evaporazione dell'acqua, inizia la formazione della crosta in superficie e termina la gelatinizzazione dell'amido.

Durante la cottura si ha, oltre all'evaporazione dell'acqua, anche la volatilizzazione di tutte quelle sostanze che hanno una temperatura di evaporazione inferiore a 100 °C, comprese quelle aromatiche che si formano durante la cottura. L'intensità della volatilizzazione dipende dalla capacità dell'impasto di trattenere i gas e cioè dalla sua impermeabilità e quindi dall'elasticità della maglia glutinica. Con una attività dell'acqua inferiore a 0.65 e una temperatura superiore a 110 °C si ha la formazione della crosta.

Intorno ai 110°C si ha la formazione delle destrine nella crosta che inizia ad assumere colore dorato.

La forte evaporazione dalla parete esterna diminuisce man mano che si forma la crosta. La crosta si forma, si ispessisce, si ha la caramellizzazione degli zuccheri presenti nell'impasto, e iniziano le reazioni di Maillard che coinvolgono zuccheri e proteine e che provocano la sua colorazione. Le reazioni di Maillard sono una serie complessa di fenomeni, che avvengono con la cottura, tra zuccheri e proteine. I composti che si formano con queste

trasformazioni sono bruni e danno il caratteristico aroma dei prodotti da forno.

La differenza di temperatura fra la superficie e l'interno dell'impasto porta l'amido a comportarsi in maniera differente: all'interno la temperatura più bassa rende l'amido a struttura colloidale formando una struttura morbida, all'esterno le temperature più alte provocano il processo di destrinizzazione e di caramellizzazione degli zuccheri presenti, dando luogo alla formazione della crosta.

A queste trasformazioni di base si aggiungono altri fattori che influiscono sul prodotto finale. La ricchezza in proteine, lo stato enzimatico della farina, la composizione dell'impasto, il tipo di forno, la presenza o meno di vapore d'acqua nella camera di cottura, il tempo di cottura sono parametri che hanno azione sulla natura della crosta, sul suo spessore, sulla sua colorazione, la sua croccantezza, sulla sua friabilità e fragilità. Ad esempio, una farina povera di proteine o di enzimi, un errore nella temperatura del forno daranno una crosta pallida e relativamente spessa, spesso dura e, a causa di una caramellizzazione e di reazioni di Maillard insufficienti, il gusto sarà penalizzato. Al contrario un impasto ricco di proteine o una temperatura del forno troppo alta daranno un eccesso di colore, una crosta più sottile e la tendenza a rammollire. E' importante sottolineare quanto il calore abbia influenza sulla formazione della crosta e sul suo spessore e quanto questo si rifletta sul gusto. La presenza di vapore d'acqua nella camera di cottura del forno al momento dell'infornamento ha molta influenza sulla cottura. Il vapore condensa sulla superficie dell'impasto a causa della differenza di temperatura con il forno, formando una sottile pellicola. La pellicola d'acqua formatasi dalla condensazione del vapore rievapora lentamente rallentando i fenomeni chimici superficiali e permettendo la formazione di una crosta meno dura e più sottile. Poiché le reazioni di Maillard e di caramellizzazione sono influenzate dall'umidità dell'ambiente si può osservare un colore diverso della crosta a seconda che la cottura sia stata effettuata o meno in presenza di vapore.

La formazione e la cottura della struttura interna dipendono anch'esse dall'effetto del calore sull'impasto. Dopo essersi sviluppato sotto l'azione della dilatazione del vapore che imprigiona, l'impasto raggiunge una temperatura che provoca la gelificazione dell'amido e la coagulazione del glutine e questo dà all'impasto stesso una struttura definitiva.

Come spesso accade è il binomio tempo temperatura che condiziona maggiormente l'aspetto e il gusto del prodotto.

In sintesi le reazioni biochimiche e fisico-chimiche che avvengono nell'impasto durante la cottura sono:

- la denaturazione delle proteine - con formazione di un reticolo glutinico (termo – strutturazione delle proteine)

- la perdita della struttura granulare dell'amido - con conseguente gelatinizzazione
- le reazioni di Maillard - con conseguente imbrunimento
- l'espansione dell'impasto dovuta a evaporazione dell'acqua, limitata dalle proprietà reologiche dell'impasto stesso
- la formazione di composti aromatici.

Oltre a suddette reazioni occorre considerare il cambiamento del contenuto di umidità, in quanto il gradiente di concentrazione dell'acqua tra impasto e ambiente esterno fa sì che l'acqua esca dal biscotto per diffusione, e il cambiamento di temperatura, fino ad arrivare alla evaporazione dell'acqua, accelera il processo di perdita della stessa.

La complessità di questo processo, con una miriade di trasformazioni di differente natura, si può in via semplificativa, assimilare a un trasferimento simultaneo di calore e umidità.

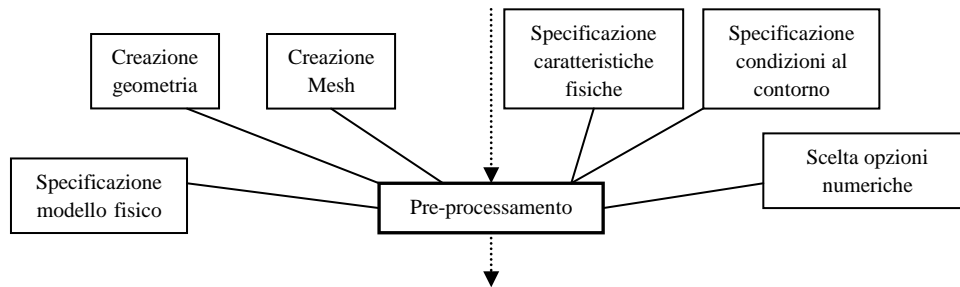
2.2 Icepack

L'Icepack viene utilizzato per refrigerare e mantenere a bassa temperatura mirtilli raccolti in campo fino a che questi non vengono trasportati al centro di raccolta.

Un'altra semplificazione è stata utilizzata per un modello che riguarda la simulazione del trasferimento di calore in uno speciale contenitore, chiamato Icepack. Questo utilizza la refrigerazione passiva, cioè il cambiamento di fase di un materiale, per mantenere la temperatura di un prodotto o di un ambiente più vicina possibile alla temperatura in cui questo cambiamento avviene, indipendentemente dal flusso di calore che giunge dall'esterno. L'Icepack è una scatola di polistirolo di circa 8 cm di altezza interna, all'interno della quale è appoggiata sul fondo una busta di plastica ermetica contenente acqua che viene mantenuta a -20°C finché non viene utilizzata. Il calore proveniente dall'esterno viene quindi assorbito dal ghiaccio, il quale, sfruttando il cambiamento di stato e il calore latente di fusione, fa sì che la sua temperatura non cambi. La simulazione vera e propria è quindi un semplice trasporto di calore con cambiamento di fase della lastra di acqua ghiacciata. In questo caso quindi il processo è molto più semplice rispetto a quello della cottura precedentemente descritto, ma possono comunque insorgere delle difficoltà computazionali. L'aria esterna lambisce la scatola, e si ha un trasporto di calore per convezione, dopo di che il trasporto avviene per conduzione attraverso le pareti della scatola e poi ancora attraverso l'aria all'interno dell'Icepack. La modellazione di una convezione naturale in un ambiente chiuso è il maggior problema che si presenta nella simulazione. Considerando però la geometria della scatola, con solo 8 cm di altezza, occupati per la maggior parte dalla presenza dei

frutti raccolti e dalla sacca di plastica contenente l'acqua, e considerando anche che la massa refrigerante è posta sul fondo e che la densità dell'aria tende a aumentare al diminuire della temperatura, senza quindi determinare un grosso 'rimescolamento' della massa di aria, ho deciso di non considerare la convezione interna. Il trasporto di calore all'interno del contenitore diventa una conduzione attraverso l'aria considerata immobile.

Capitolo 3: pre-processamento



È senza ombra di dubbio la fase che richiede più tempo per essere completata.

3.1 Decisioni pre-processamento

Bisogna innanzi tutto trasferire e gestire all'interno del software tutte quelle decisioni che sono state prese durante la soluzione teorica (quello che in figura 1.2 è riportato come 'specificazione del modello fisico'):

- decidere, quindi, quali siano le equazioni da risolvere (quelle legate al processo ritenuto fondamentale);
- in che modo risolverle: utilizzando una 'multi-fisicità' (più fenomeni strettamente accoppiati, gestiti dal software come un unico fenomeno) o semplicemente risolvendo una dopo l'altra le equazioni (più fenomeni che accadono contemporaneamente indipendenti l'uno dall'altro e quindi gestiti come tali, con conseguente minor utilizzo di risorse per la soluzione).

3.1.1 Cottura del biscotto

Nella modellazione della cottura di un prodotto da forno, il fenomeno che deve essere descritto è una complessa serie di trasformazioni bio-chimico-fisiche, attraverso le quali un impasto diventa un biscotto. Già nella fase precedente (soluzione teorica) si è scelto di semplificare tutto il processo a due soli fenomeni, il simultaneo trasferimento di calore e di materia (umidità). Le caratteristiche fisiche del materiale in esame sono strettamente legate sia alla temperatura che all'umidità del materiale stesso: è ovviamente impossibile prescindere dall'accoppiare il trasferimento di calore e quello di umidità per ottenere una simulazione che porti a dei buoni risultati. Nel caso specifico poi c'è da considerare anche la formazione della crosta, che secondo molti autori a livello internazionale (Vanin et al., 2009, Jefferson et al. 2007) è da considerarsi una vera e propria barriera a ogni tipo di

trasferimento. Anche in questo caso è impossibile pensare di disaccoppiare i due trasferimenti, visto che la crosta si viene a formare quando si hanno specifiche condizioni di temperatura e di umidità.

3.1.2 Precipitazione tartarica

La precipitazione tartarica nel vino è un processo altrettanto complesso a quello della cottura. In questo caso si ha un abbassamento della temperatura per diminuire il coefficiente di solubilità del composto, in maniera da far precipitare quello in eccesso. La situazione è complicata dal deposito di questo precipitato a livello delle serpentine di raffreddamento, che diminuiscono l'efficienza dello scambio termico e portano anche a cambiamenti della geometria del modello stesso. In partenza ho pensato di considerare tutti i processi simultaneamente, ma la gestione era improponibile per il processore e per la memoria che avevo a disposizione in quel momento, quindi ho provato a disaccoppiare i fenomeni per vedere se fosse possibile farlo. Un primo modello è stato elaborato considerando soltanto il trasferimento di calore con accoppiata un'analisi fluido-dinamica di convezione naturale all'interno del tino di precipitazione. Dopo poco tempo (relativamente al processo di precipitazione che viene attuato per una settimana) la temperatura si poteva ritenere uniforme. Si è quindi simulato in un altro modello la reazione chimica di formazione del bitartrato di potassio (la specie chimica che precipita) alla temperatura di regime. Dopo di ch , considerando la cinetica di formazione del bitartrato ho modellato, in un'ulteriore simulazione, il deposito del precipitato sulle pareti in cui avviene il raffreddamento. In questo caso i processi, seppur nella realt  siano contemporanei, sono facilmente disaccoppiabili, e quindi il modello pu  tranquillamente essere diviso in sotto-modelli pi  semplici da elaborare e da gestire.

3.2 Geometria

A questo punto   necessario disegnare la geometria, la pi  dettagliata possibile, ma anche in questo caso tenendo presente quale sia l'obiettivo, e di conseguenza il livello di precisione che si vuole raggiungere, in quanto pi  dettagli geometrici ci sono, maggiore sar  il numero degli elementi, di conseguenza maggiore il numero dei gradi di libert  e maggiore sar  il tempo impiegato per l'elaborazione. Inoltre non   detto che i dettagli geometrici siano fondamentali per lo scopo del lavoro.

3.2.1 Supporti Masi

La Masi agricola, leader nella produzione di Amarone della Valpolicella, ci ha incaricato di effettuare degli studi su differenti supporti per l'appassimento delle uve. Il modello è stato creato per simulare la fluidodinamica all'interno dei supporti ipotizzando flussi che provenivano da differenti direzioni. La definizione di una geometria estremamente precisa dei supporti è a questo punto di vitale importanza per poter valutare in maniera oggettiva quale di questi presenta un maggior grado di aerazione. In figura 3.1 è presentata la geometria disegnata con COMSOL di una cassetta di un materiale misto resina-segatura in tutti i suoi dettagli e in figura 3.2 il risultato di una simulazione su quella geometria con aria proveniente dal lato della freccia a una velocità di 0.12 m/s (velocità rilevata sperimentalmente nei locali di appassimento). Dalla figura 3.2, che mostra il risultato della simulazione, si nota che i fori presenti sul fondo della cassetta non influiscono, a queste velocità, sulla fluidodinamica del sistema.

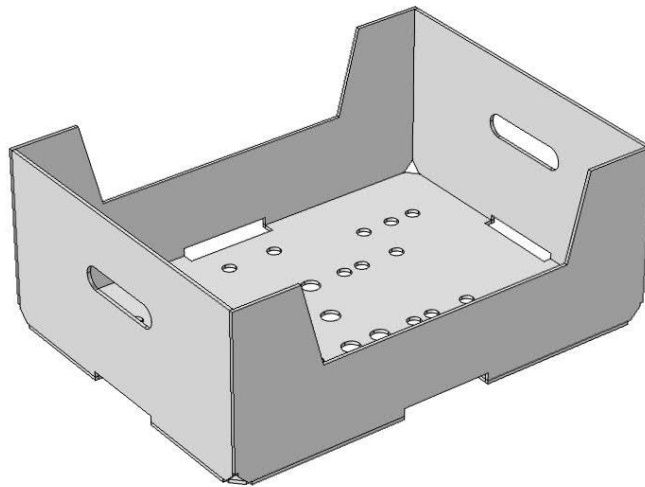


Figura 3.1: geometria della cassetta AgriPar

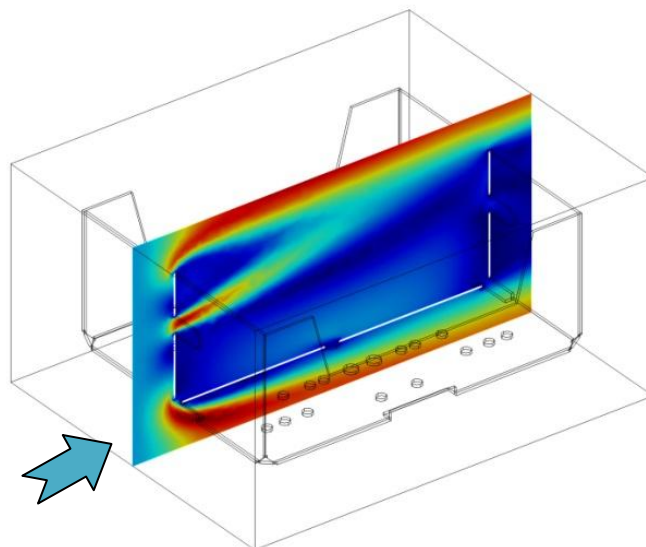


Figura 3.2: risultato della simulazione della cassetta AgriPar con provenienza dell'aria dalla direzione della freccia

A questo punto per le altre geometrie ho deciso di eliminare i dettagli dal fondo risparmiando così sul numero di elementi che formeranno la mesh e quindi sul numero dei gradi di libertà del sistema. Nella tabella 3.1 sono mostrate le geometrie reali e quelle che sono state utilizzate per i vari modelli.

L'unica eccezione a questa eliminazione di dettagli è stata fatta per un tipo di supporto progettato per favorire il cambiamento di direzione del flusso da orizzontale a verticale, attraverso dei setti posti nel doppiofondo della cassetta (come mostrato in figura 3.3). In questo caso quindi non si possono eliminare i dettagli del fondo perché è proprio lì che si concentra l'attenzione della simulazione.

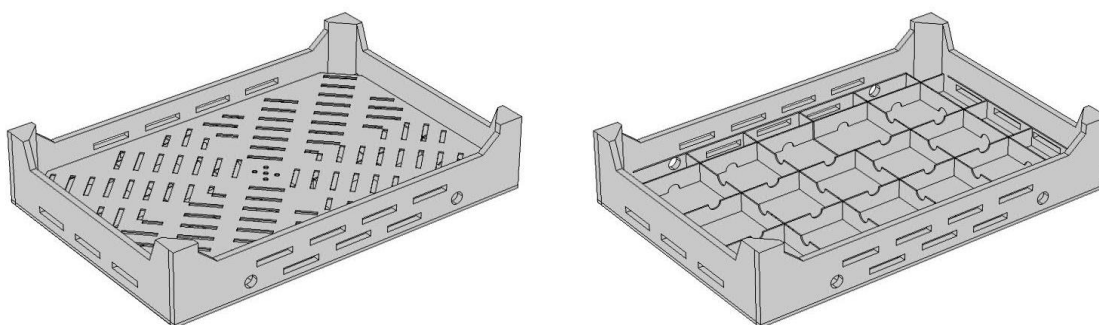


Figura 3.3: geometria della cassetta DoppioFondo con e senza griglia per appoggio uva

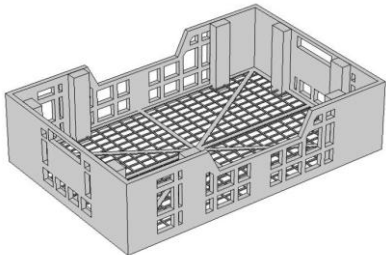
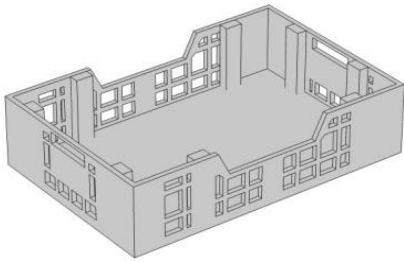
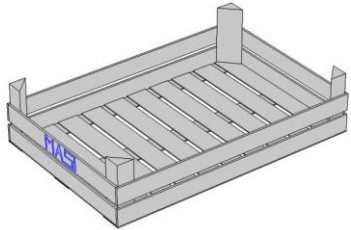
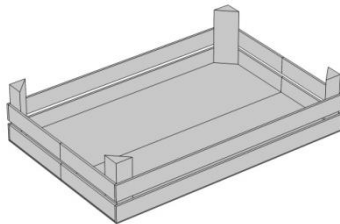
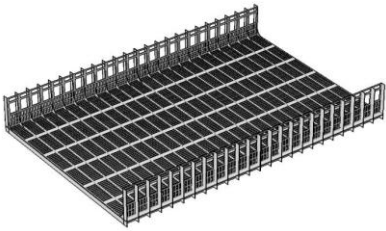
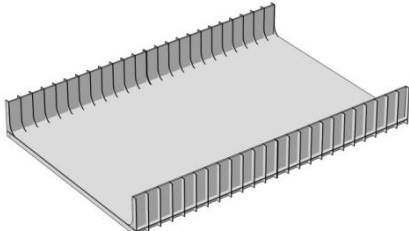
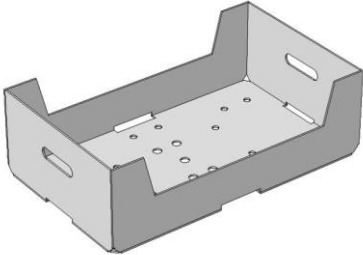
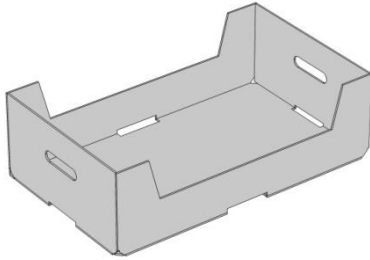

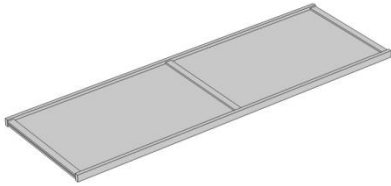
Cassetta di plastica		
Cassetta di legno		
Super Plateaux		
Cassetta F.lli Polise		
Arella bambù		

Tabella 3.1: geometria reale (sx) e geometria utilizzata per la simulazione (dx)

Sono ricorso in questo caso ad un altro tipo di semplificazione: ho reso il modello bidimensionale, sfruttando il fatto che il cambiamento di direzione, se c'è, è comunque evidenziabile. La geometria si è quindi trasformata come in figura 3.4, considerando anche l'impilamento di 4 cassette l'una sull'altra. Viene mostrato anche il campo delle velocità come risultato della simulazione.

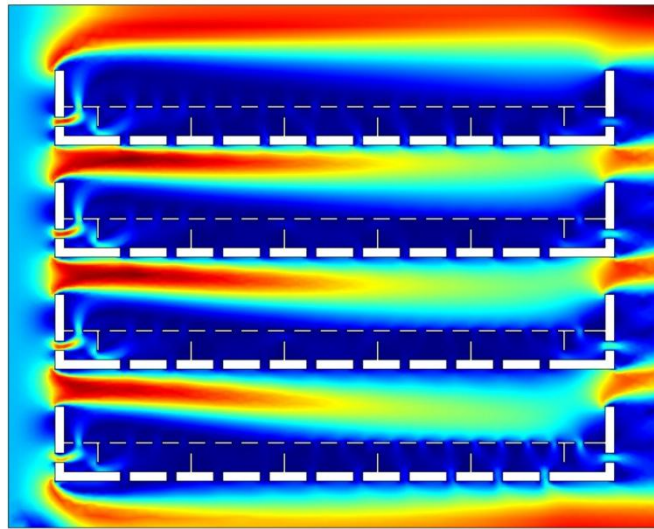


Figura 3.4 Risultato modello cassetta DoppioFondo

3.2.2 Icepack

Come abbiamo già visto, il modello descrive il trasporto di calore all'interno di un refrigeratore passivo. Questo modello è stato sviluppato, in realtà, in più fasi. La prima fase è servita per determinare quale sia, a contenitore vuoto, il tempo di scioglimento del ghiaccio: il risultato del modello ben concorda con quello sperimentale. È poi seguita una seconda fase sperimentale dove all'interno del contenitore venivano posti i mirtilli raccolti in campo (figura 3.5).



Figura 3.5: Icepack riempito con mirtilli

La geometria del modello che ne seguiva è stata disegnata come una lastra con caratteristiche termiche derivanti da una media pesata delle caratteristiche dei mirtilli e dell'aria. Sfruttando la simmetria, soltanto un quarto della geometria complessiva è stata disegnata (figura 3.6). I risultati sono stati mediamente soddisfacenti.

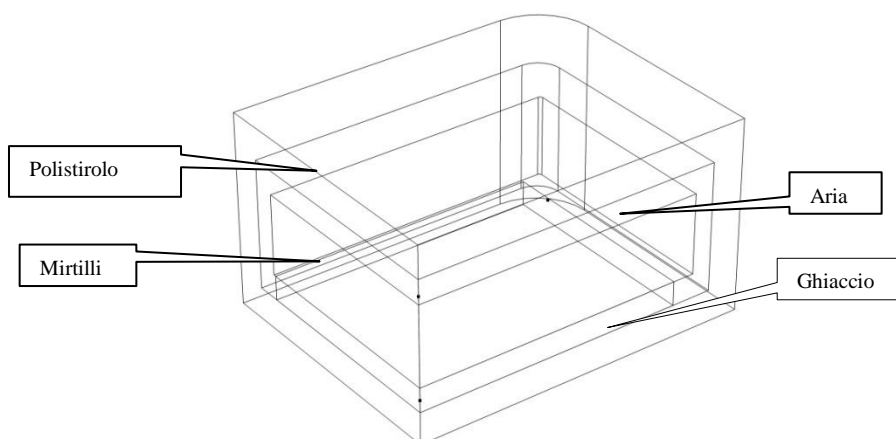


Figura 3.6: 1° geometria Icepack

Un ulteriore affinamento ha portato a disegnare i frutti singolarmente. Attraverso un codice MatLab messo a punto per l'occasione è stata sviluppata una distribuzione casuale dei frutti approssimati a sfere (figura 3.7). I risultati ottenuti sono, in effetti, migliori rispetto a quelli derivati dal modello con la lastra.

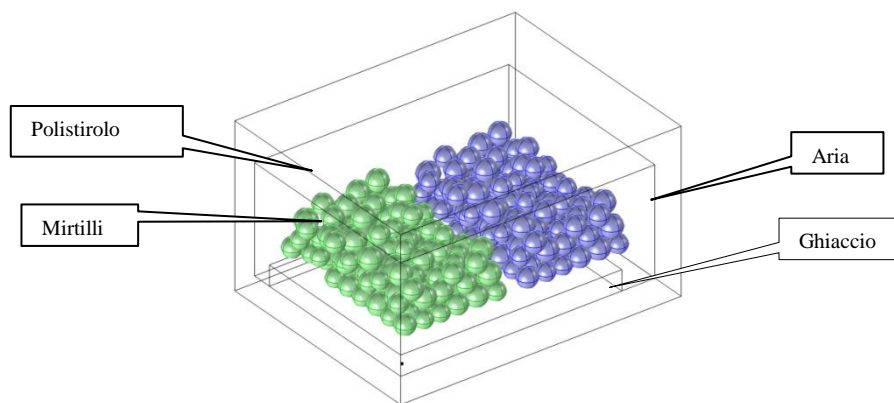


Figura 3.7: 2° geometria Icepack

Abbiamo detto finora della economicità in termini di tempo e di risorse utilizzate dai modelli, ma in questo caso ciò non è, in termini relativi, così. Confrontiamo i tempi di analisi dei due modelli. Nel primo caso la mesh generata automaticamente dal software con un raffinamento ‘normal’ produceva 14398 elementi e di conseguenza 20490 gradi di libertà, e dopo una elaborazione di circa 4 ore si arriva al risultato. Nel caso dei frutti simulati invece, la mesh generata in maniera ‘coarse’ è stata di 87271 elementi e di conseguenza 117967 gradi di libertà, con un tempo di risoluzione di circa 24 ore. La differenza tra i due tipi di mesh è nelle dimensioni minime e massime che possono avere gli elementi. Nel caso di un raffinamento ‘normal’ le dimensioni minime sono di $4.2 \cdot 10^{-4}$ mm e le massime di 0.0938 mm, mentre con un raffinamento ‘coarse’ la minima è $2.8 \cdot 10^{-3}$ mm e la massima 0.14 mm. Al tempo impiegato per l’elaborazione si deve aggiungere quello utilizzato da Matlab per generare i frutti (vedi dettaglio MATLAB SCRIPT), che è stato pari a circa 4 ore per le 280 sfere.

Per la fase di ottimizzazione del processo bisognerà valutare se il miglioramento nell’accuratezza del risultato tra la geometria simulata con MatLab e quella della lastra con le proprietà combinate sia fondamentale per lo scopo che ci si era prefissi.

MATLAB SCRIPT

La distribuzione casuale della terza geometria è stata realizzata mediante un script originale di MatLab.

Il codice randomizza il diametro dei frutti (considerati sferici) con una distribuzione gaussiana, determinata sperimentalmente da un lotto di questi.

Le dimensioni del contenitore di plastica per i frutti è il risultato dello spazio vuoto dovuto alla intersezione di cinque sfere di raggio molto grande. La posizione dei centri di 4 di loro è sullo stesso piano della scatola, mentre la quinta, che determinerà il fondo è sulla verticale del centro della scatola. La distanza e di conseguenza il raggio di queste è tale che la curvatura della superficie sferica possa non essere considerata.

Si è ipotizzato che un frutto (sfera) per restare in equilibrio debba appoggiarsi in tre punti della geometria che è già stata disegnata (compresa la scatola).

Non è permessa nessuna sovrapposizione delle sfere. Delle varie terne di valori (x, y, z) possibili che soddisfano queste condizioni, e che determinano la posizione del centro si prende quella con energia potenziale assoluta minore.

Il ciclo termina quando tutte le sfere sono state posizionate.

3.3 Caratteristiche fisiche

Bisogna poi caratterizzare attraverso le loro proprietà termo-fisiche i materiali che sono stati impiegati per la simulazione. Non tutte le informazioni sono reperibili in maniera semplice o sono catalogate in qualche database, spesso le matrici alimentari che vengono simulate hanno nessuno o pochi riferimenti in bibliografia, quindi le caratteristiche non disponibili devono essere misurate con sperimentazioni messe a punto appositamente.

3.3.1 Determinazione diffusività biscotto

La determinazione di questa grandezza, cioè la capacità di un soluto di diffondere attraverso una matrice, è spesso causa di errori nei modelli, ed è il parametro che ha più incertezza di tutti nelle proprietà termo-fisiche.

È stato utilizzato un primo approccio sfruttando una equazione matematica descritta da Crank nel 1975, determinando l'umidità di differenti settori del biscotto a diversi tempi di cottura, in maniera che dalle differenze riscontrate si potesse risalire alla diffusività. Nel mio caso la formula utilizzata è (Senadeera et al. ,2003):

$$D = \frac{r^2 \cdot L^2}{(b_1^2 \cdot L^2 + \rho^2 \cdot r^2) \cdot t} \cdot \ln \left(\frac{b_1^2 \cdot \rho^2}{32} \cdot MR \right)$$

dove r è il raggio del biscotto, L la sua altezza, β il coefficiente di Bessel e MR il valore determinato sperimentalmente dalle umidità misurate. MR è definito dalla formula:

$$MR = \frac{W - W_{\infty}}{W_{init} - W_{\infty}}$$

dove W è l'umidità (espressa in kg acqua/kg totali) e i pedici 'init' significa iniziale e ∞ significa all'equilibrio.

La diffusività dell'umidità nella mollica risulta essere pari a $1.305 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Con questo tipo di approccio però i risultati non sono stati soddisfacenti.

Una seconda soluzione per determinare il coefficiente di diffusività dell'impasto è stata cercata utilizzando una tecnica non distruttiva (spettroscopia NIR). L'idea di questa sperimentazione è venuta dal fatto che il modello offre la possibilità di avere una concentrazione puntuale dell'acqua presente, mentre nella realtà questo è possibile attraverso metodi indiretti quali appunto la spettroscopia NIR. Questa tecnica si basa sul fatto che una radiazione incidente su un materiale, viene in parte riflessa, una parte viene assorbita e una parte viene trasmessa. Lavorando in riflettanza, come nel mio caso, la parte che interessa è quella riflessa. Una fibra ottica con dei fasci che portano la luce da una lampada viene avvicinata al biscotto a vari gradi di cottura, quindi a differenti umidità. La stessa fibra ha un fascio che invece porta le radiazioni riflesse allo spettrofotometro, il quale visualizza lo spettro complessivo. A determinate lunghezze d'onda avrà degli assorbimenti peculiari di un tipo di legame chimico (ad esempio a 1450 nm ho l'assorbimento dovuto ai legami O-H). Una modificazione del contenuto di acqua porta quindi a una modificazione degli spettri. È stata quindi effettuata la campagna sperimentale per la determinazione degli spettri correlata all'analisi distruttiva di misurazione dell'umidità e relativa elaborazione statistica chemiometrica dei dati per la realizzazione di un modello di regressione, poi ottenuto con un r^2 pari a 0.93. Le prove effettuate successivamente per poter determinare l'umidità con il metodo non distruttivo sul biscotto hanno portato a risultati non coerenti con quelli attesi.

Si è quindi provveduto a provare una terza strada per la determinazione di questa grandezza, cioè utilizzare il cosiddetto 'metodo inverso'. Il metodo inverso consiste nell'utilizzare il modello per la determinazione di una proprietà conoscendo l'evoluzione di una grandezza che questa proprietà influenza. Utilizzando una geometria semplice, condizioni al contorno ben misurabili e prendendo come incognita la proprietà da determinare si procede con una campagna sperimentale. Contemporaneamente si utilizza il

modello nelle stesse condizioni per determinare i risultati, parametrizzando la proprietà di interesse e fittando i risultati del modello con i dati sperimentali. Nel mio caso, per la determinazione di D , sono stati creati dei cilindri di diametro e altezza uguali pari a 3 cm con l'impasto del biscotto e sono stati cotti per differenti tempi. Sono poi stati inseriti, su appositi supporti, in barattoli ermetici contenenti acqua, in modo da creare una situazione di ambiente saturo, e questi immessi in un ambiente termostato. Provvedendo alla pesatura dei cilindri a tempi diversi si determina la quantità di acqua che è stata assorbita dal campione. Parallelamente è stato sviluppato un modello equivalente, sfruttando la simmetria assiale del cilindro, bidimensionale. Le condizioni al contorno sono note essendo nota la temperatura e l'umidità relativa, quindi il modello viene risolto con differenti valori di D . I dati sperimentali vengono a questo punto immessi nel software e si valuta per quale valore di D i risultati provenienti dal modello sono più vicini a quelli sperimentali. Procedendo con questa tecnica per modelli successivi si può affinare a dovere il risultato. Da questo modello si ottiene un valore di D pari a $3.4526 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Ultimamente è stato realizzato un nuovo modulo del software in dotazione (Optimization Module) che realizza in automatico questo procedimento di affinamento del parametro. In questo caso si indica quale è la proprietà che deve essere modificata, e qual è l'obiettivo da raggiungere.

Questa è una tecnica ancora poco utilizzata, ma che rende in maniera evidente quali siano i vantaggi della realizzazione di un modello, in qualunque modo poi si vadano ad utilizzare i risultati, sia per determinare una caratteristica incognita, sia per poter prendere decisioni strategiche.

3.4 Condizioni al contorno

Anche le condizioni al contorno, cioè le condizioni esterne alle quali è sottoposto il dominio spaziale di studio, sono definite in questa fase. Come per le caratteristiche fisiche, non sempre le condizioni sono standardizzate, quindi anche in questo caso la determinazione avviene per mezzo di sperimentazioni (quando il parametro è misurabile) o attraverso degli accorgimenti informatici.

3.4.1 Cottura del biscotto: Umidità assoluta dell'aria e conduttanza convettiva

Abbiamo già visto come l'umidità dell'aria all'interno della camera di cottura dei prodotti da forno sia fondamentale per il risultato finale. Il problema è trovare il valore di questa grandezza nelle condizioni utilizzate durante la validazione del modello. Si è proceduto in questo caso a una

campagna sperimentale, poiché è possibile misurare questa grandezza in maniera piuttosto semplice, attraverso sensori appositi. L'unica difficoltà è che gli strumenti di misura non sopportano temperature tanto elevate quanto quelle che si trovano nella camera di cottura. Si è quindi provveduto a effettuare una derivazione della camera di cottura, attraverso tubi uniti ermeticamente allo sfogo della stufa da un lato e a una camera stagna dall'altro (figura 3.8). All'interno di questa scatola è stato posto il sensore, e durante il percorso attraverso il tubo l'aria calda della camera di cottura veniva raffreddata dall'aria circostante, rendendo possibile questa misurazione.

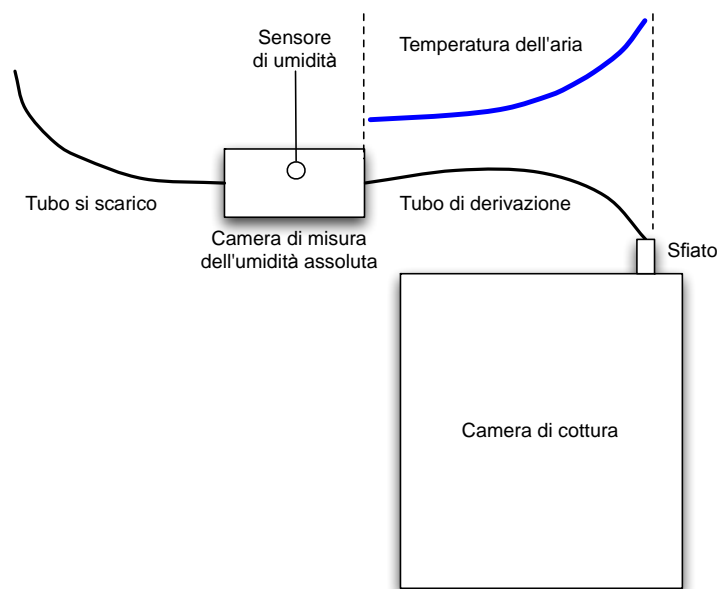


Figura 3.8: apparato per la misurazione dell'umidità assoluta della camera di cottura

La conduttanza convettiva non è stata misurata attraverso prove sperimentali, molto complesse e molto costose, ma calcolata attraverso la simulazione stessa. In particolare, sempre nel caso della modellazione della cottura di prodotti da forno, è stata inserita nella geometria della seconda versione (la prima dava risultati poco soddisfacenti) anche la camera di cottura e non solo il prodotto, lasciando calcolare al software (avendo a disposizione tutte le informazioni necessarie) il valore puntuale della grandezza. Si è poi verificato che i risultati ottenuti fossero in accordo con le condizioni sperimentali (figura 3.9).

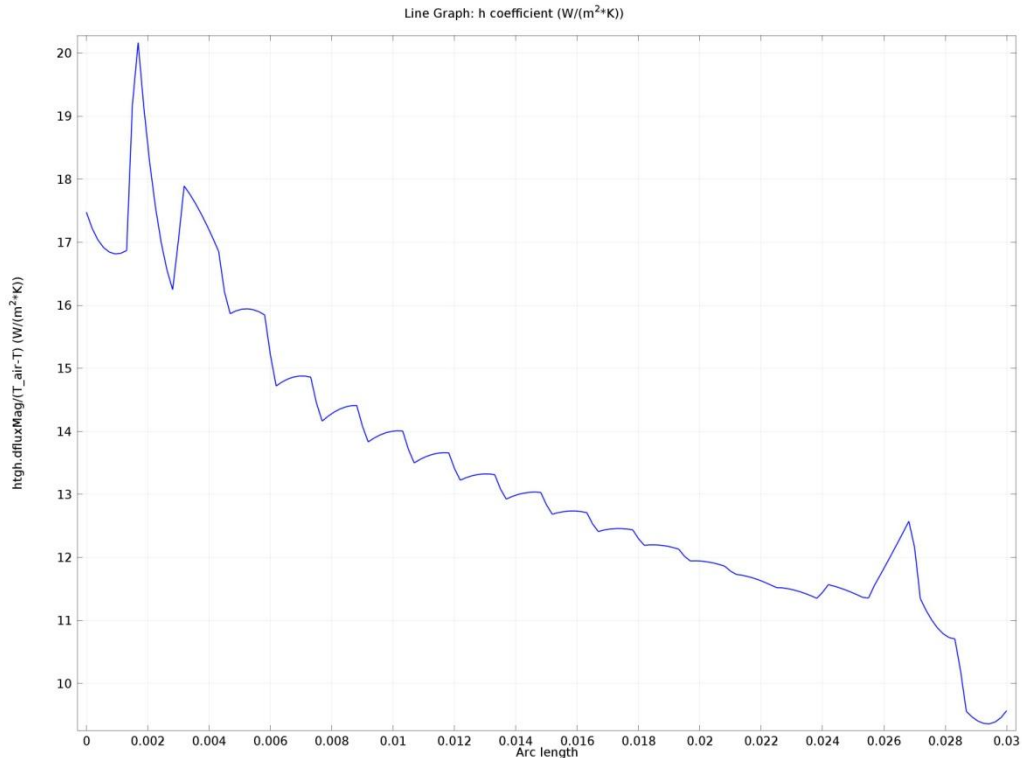


Figura 3.9: grafico coefficiente di conduttanza convettiva del lato del biscotto

3.5 Mesh

Una volta definiti tutti i parametri del sistema, e quindi aver completato la parte di caratterizzazione del processo, si entra nell'utilizzo vero e proprio del software. Si passa alla creazione della mesh, cioè alla divisione del dominio di partenza negli elementi elementari caratteristici del metodo utilizzato. Anche questa parte, che può essere gestita in maniera autonoma dal software, può venire modificata dall'operatore, e l'intervento è molto spesso caratterizzante per il processo di soluzione. È chiaro che una divisione troppo rada del dominio porta ad un risultato affetto da errori grossolani, mentre un infittimento non necessario della mesh porta sì a maggiore accuratezza dei risultati ma a tempi di risoluzione molto più lunghi (con una legge più che proporzionale). Una zona della geometria che non necessita di grosse attenzioni potrà essere divisa in elementi relativamente grandi, mentre sarà importante che zone di particolare interesse, ad esempio i confini tra una zona fluida e una solida, abbiano elementi molto piccoli.

3.5.1 Cottura del biscotto: Discretizzazione del dominio

La divisione del dominio di partenza del modello è altamente influenzata dalle regioni di maggior interesse della geometria (figura 3.10). La geometria prevede un quadrato con lato 3 cm rappresentante il biscotto, sfruttando la sua geometria assiale, e uno spazio intorno a questo,

rappresentante la camera di cottura di 30x15 cm. La mesh completa consiste in 2825 triangoli che generano 17628 gradi di libertà, con 1548 elementi all'interno del biscotto e 1277 elementi nella camera di cottura. Ciò significa che nelle regioni di maggior interesse (vicino ai punti in cui sono presenti le sonde sperimentali di temperatura e sui contorni del biscotto) si ha una densità 10 volte maggiore rispetto al resto della geometria

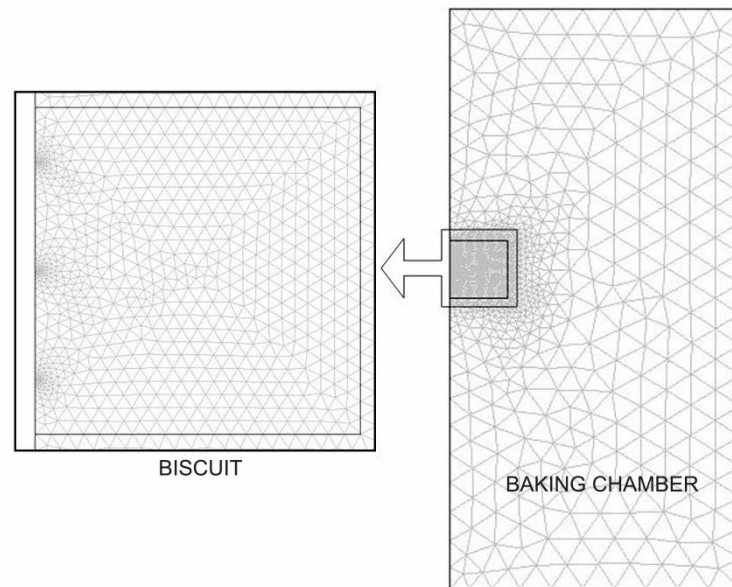


Figura 3.10: mesh della camera di cottura e in particolare del biscotto

3.5.2 Cottura del biscotto: Grid independence study

Questo tipo di considerazioni sulla qualità della mesh e sulla bontà dei risultati si fa attraverso uno studio di indipendenza dalla griglia (grid independence study). Operativamente si sviluppa un modello con una determinata divisione, se ne registrano i risultati e poi si fa risolvere nuovamente il modello con una mesh differente, o più rada o più fitta e si registrano nuovamente i risultati. Le differenze o meno dei risultati registrati determina quale sarà la migliore combinazione di divisione e accuratezza dei risultati. Ad esempio per il modello sulla cottura dei prodotti da forno, si è provveduto a effettuare lo studio con tre differenti quantità di elementi. La prima coppia di griglie dava i seguenti risultati sulla differenza di temperatura e di umidità tra due punti, uno nella camera di cottura e l'altro all'interno della massa del biscotto:

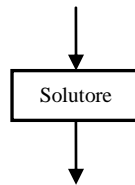
	Course (548 elements)	Fine (2825 elements)	% change
ΔT (K)	92.65	93.28	0.68
Δc (kg/m ³)	161.52	158.10	2.16

cioè il cambiamento di griglia fa variare il risultato del 2.16% nel caso dell'umidità, quindi il risultato è fortemente influenzato dalla divisione del dominio. La seconda coppia di griglie (una delle due è la stessa di prima) dà i seguenti risultati:

	Course (2825 elements)	Fine (8340 elements)	% change
ΔT (K)	93.28	93.31	0.03
Δc (kg/m ³)	158.10	158.05	0.03

In questo caso le differenze dovute al cambiamento di griglia sono molto minori rispetto alle precedenti e in valore assoluto non significativi per il risultato. Questo vuol dire che la griglia con 2825 elementi è il miglior compromesso tra l'accuratezza dei risultati e le prestazioni del sistema (misurate come tempo impiegato per l'ottenimento del risultato). Una griglia più rada restituisce risultati approssimati lontani da quelli reali e una griglia più fitta impegna maggiormente il processore e la memoria senza aggiungere accuratezza nei risultati.

Capitolo 4: solutore



Considerando che questo metodo è un metodo numerico e che quindi la soluzione sarà approssimata, l'ultima decisione che si deve prendere nella delicatissima fase del pre-processamento, ma che influenza in maniera determinante la fase del solutore, è quale sia il metodo numerico più adatto per arrivare al risultato. Esistono all'interno del pacchetto numerosi solutori, i quali si possono distinguere in due grandi categorie: quelli che utilizzano risorse del processore, e che quindi necessitano di grandi velocità di gestione dati e quelli che invece utilizzano risorse di memoria, che al contrario richiedono grandi quantità di RAM. Considerando il mercato attuale, con i costi delle memorie hardware sempre più bassi, questa seconda categoria è quella preferibile tra le due, tenendo presente che, perdendo un po' in velocità, c'è sempre la possibilità di utilizzare la memoria virtuale (spazio sul disco fisso da destinare all'utilizzo della memoria RAM) per arrivare alla soluzione.

È questa la fase di costruzione della matrice e della risoluzione vera e propria delle equazioni. A seconda del tipo di modello e della sua complessità cambia lo sforzo richiesto al processore e l'impiego della memoria, così come il tempo di risoluzione. È possibile, anzi comune, che il tempo di risoluzione sia dell'ordine delle ore o addirittura dei giorni.

4.1 Funzione lineare

Partiamo con un semplice esempio di come il solutore svolge il suo compito. Immaginiamo di avere una molla con costante elastica k pari a 4 N/m, e un carico p pari a 2 N. Si vuole trovare lo spostamento del punto materiale a cui è applicata la forza (figura 4.1).

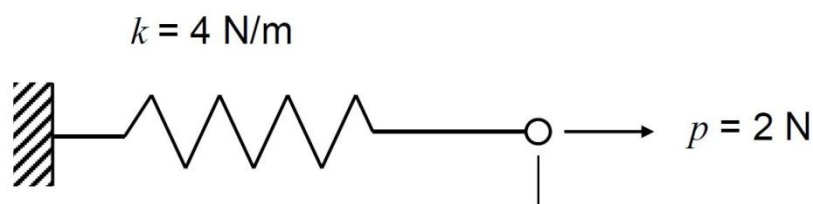


Figura 4.1: esempio di fisica descritta da una funzione lineare

L'equazione da risolvere per arrivare al risultato è:

$$f(u) = p - k \cdot u = 0$$

Visto che questo è un semplice problema lineare, risolvibile anche per via analitica, in una unica interazione si arriva alla convergenza e quindi al risultato (figura 4.2).

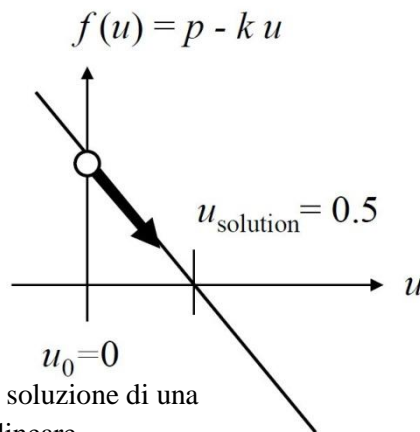


Figura 4.2: soluzione di una equazione lineare

Il solutore parte da u_0 , trova la derivata prima della funzione in quel punto $f'(u_0)$, ed essendo lineare la soluzione, si traccia una retta e si arriva al risultato.

4.2 Funzione non lineare

Nel caso di una funzione non lineare le cose si complicano molto da un punto di vista analitico e richiedono qualche interazione in più anche per il metodo numerico. Immaginiamo di avere una equazione di questo tipo, impossibile da risolvere analiticamente (figura 4.3):

$$f(u) = 2 - u \cdot e^u = 0$$

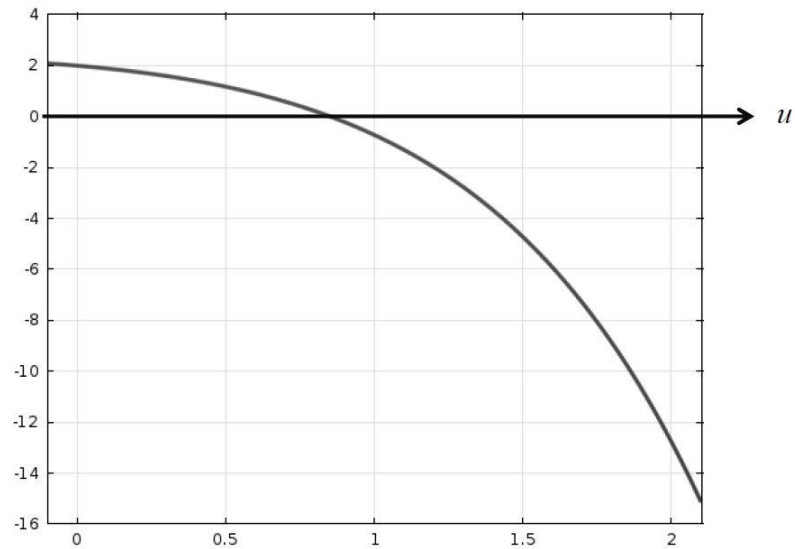
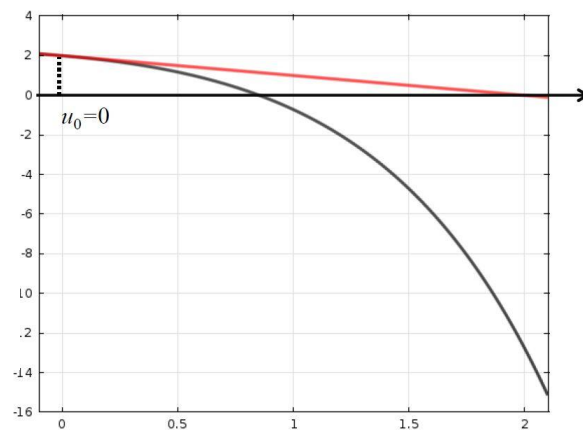


Figura 4.3: rappresentazione grafica di una equazione non lineare

Analogamente a quanto visto per le funzioni lineari, il solutore trova la derivata nel punto iniziale, traccia la linea come se la soluzione fosse lineare e trova il punto in cui $f(u)_{\text{lineare}} = 0$ (figura 4.4)

i	u_i	$f(u_i)$
0	0.000	2.000

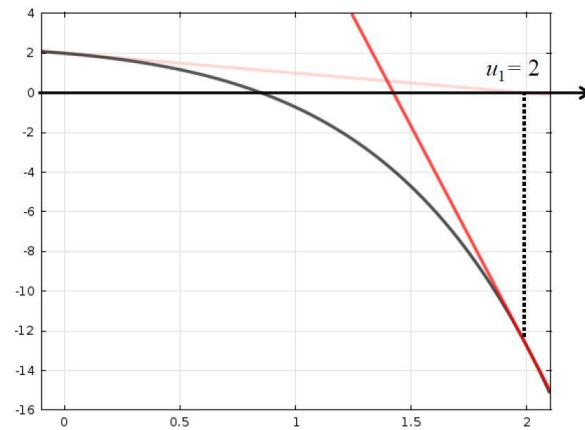
Figura 4.4:
soluzione lineare



Ora esegue lo stesso procedimento partendo dal punto u_1 determinato dalla soluzione della prima interazione (figura 4.5).

i	u_i	$f(u_i)$
0	0.000	2.000
1	2.000	-12.77

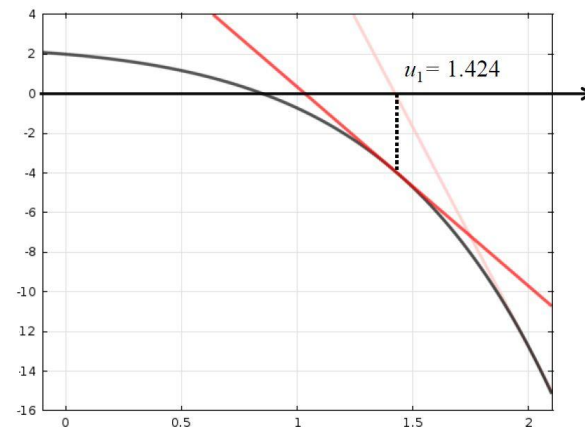
Figura 4.5:
1° interazione



Stesso procedimento per la seconda interazione

i	u_i	$f(u_i)$
0	0.000	2.000
1	2.000	-12.77
2	1.424	-3.915

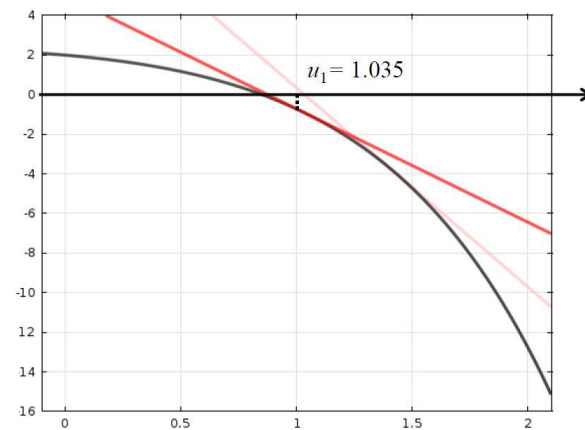
Figura 4.6:
2° interazione



E così di seguito fino ad arrivare alla soluzione finale (figure 4.7 e 4.8)

i	u_i	$f(u_i)$
0	0.000	2.000
1	2.000	-12.77
2	1.424	-3.915
3	1.035	-0.914

Figura 4.7:
3° interazione



i	u_i	$f(u_i)$
0	0.000	2.000
1	2.000	-12.77
2	1.424	-3.915
3	1.035	-0.914
4	0.876	-0.104
5	0.853	0.002
6	0.852	0.001

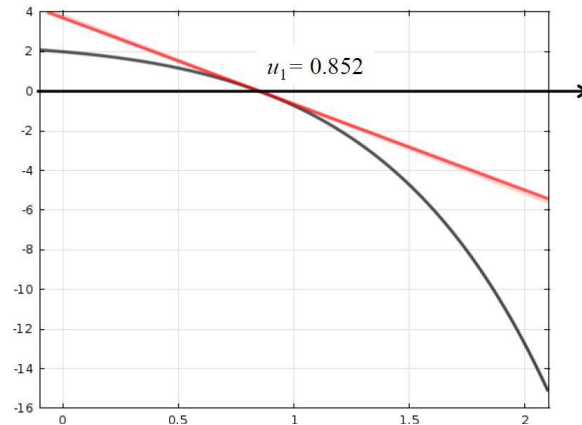


Figura 4.8: soluzione finale

Ma in che modo viene deciso quando fermare il calcolo e quindi dire che la soluzione trovata è la soluzione finale?

Un primo sistema è il numero di interazioni massime che il solutore deve eseguire; una volta raggiunto questo numero si ferma e visualizza il risultato. Se la convergenza non ha raggiunto un livello soddisfacente l'utente viene avvisato, per mezzo di un pop up.

L'altro metodo per il quale il solutore arriva ad una soluzione finale, ed è auspicabile che sia questo il sistema, è arrivare a convergenza. Analizzando la tabella 4.1 si nota che il valore di $f(u_i)$ tende ad avvicinarsi a 0. Questo è già un segnale che si sta arrivando alla convergenza della soluzione.

È però molto più importante che tendano a 0, per arrivare a convergenza, il valore assoluto della differenza tra u_i e u_{i-1} e il valore della funzione in questi due punti (ultime due colonne della tabella).

Alla sesta interazione sia il valore della funzione nel punto 0.852 (terza colonna), sia la differenza tra 0.853 e 0.852 (quarta colonna), che la differenza tra 0.002 e 0.001 (quinta colonna) è pari a 0.001, il che definisce la fine delle interazioni e quindi la soluzione finale.

i	u_i	$f(u_i)$	$ u_{i-1} - u_i $	$ f(u_{i-1}) - f(u_i) $
0	0.000	2.000		
1	2.000	-12.77	2.000	10.77
2	1.424	-3.915	0.576	8.855
3	1.035	-0.914	0.389	3.001
4	0.876	-0.104	0.159	0.810
5	0.853	0.002	0.023	0.102
6	0.852	0.001	0.001	0.001

Tabella 4.1: interazioni e valori per valutare la fine della simulazione

Dalla tabella 4.1 si può ricavare il grafico relativo alla differenza del valore assunto dalla funzione in due punti di due interazioni successive in funzione del numero dell'interazione, che nel caso preso ad esempio è illustrato nella figura 4.9.

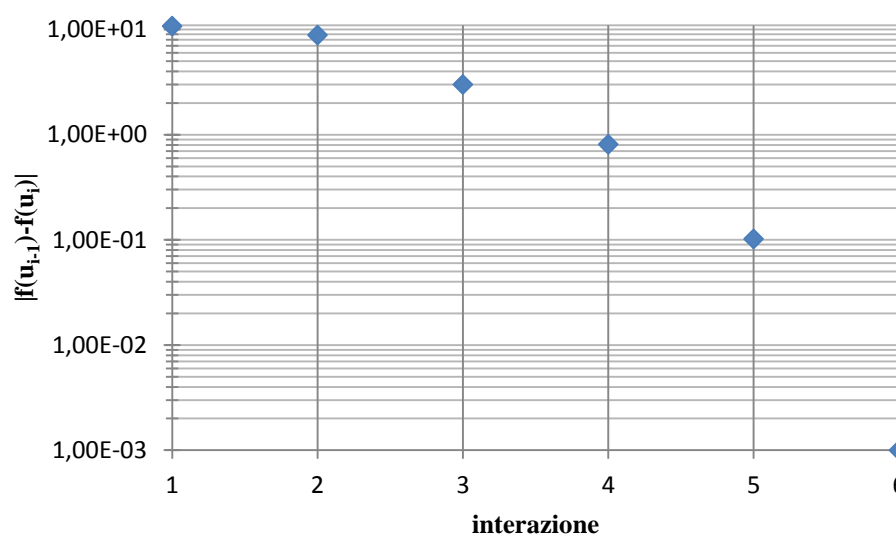


Figura 4.9: differenza di valori tra due interazioni successive

4.2.1 Damping

Nel caso in cui il numero delle interazioni per arrivare a convergenza sia estremamente elevato, esiste la possibilità di effettuare l'interazione successiva con il cosiddetto "Damping". Questa tecnica valuta il valore della funzione in due interazioni successive ottenute come nell'esempio precedente e se il valore assoluto della seconda è maggiore rispetto alla prima, si prende in considerazione un punto all'interno dell'intervallo per calcolare la seconda interazione, in modo da diminuirne il numero e arrivare più rapidamente alla soluzione (figura 4.10).

Se	$ f(u_{i+1}) > f(u_i) $
si trova	$\Delta u = u_{i+1} - u_i$
e si sceglie	$0 < \alpha < 1$
tale che	$ f(u_i + \alpha \Delta u) < f(u_i) $

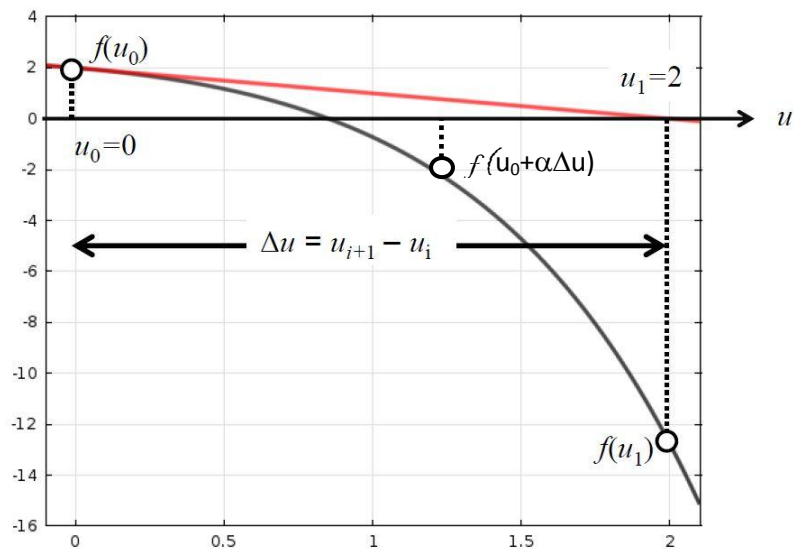


Figura 4.10: effetto del damping

4.2.2 Carichi progressivi

Un altro sistema per arrivare a una soluzione è quello di andare per step successivi (figura 4.11). Utilizzando l'esempio proposto precedentemente (v.4.1), se al sistema applico un carico p pari a 0 questo è imperturbato, poi applico un carico infinitesimo (0.05) e trovo la soluzione. Partendo da questa aumento il carico (0.50; 1,00) e trovo un'ulteriore soluzione, fino ad arrivare alla soluzione finale con il carico voluto (2.00).

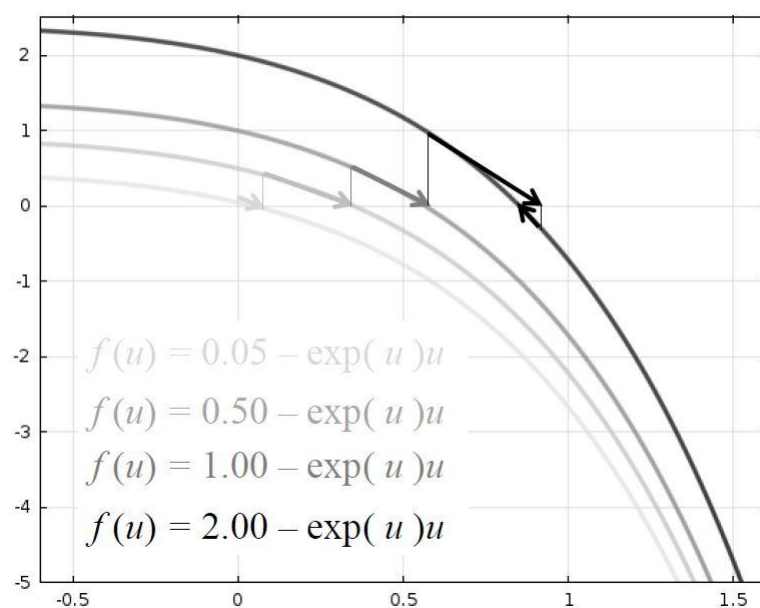


Figura 4.11: effetto dei carichi progressivi

4.2.3 Non linearità progressiva

Un ulteriore metodo per arrivare alla soluzione, ma che in realtà non ho mai impiegato nei miei modelli, è quello di utilizzare una nuova variabile che farò crescere da 0 a 1 in maniera progressiva e che tiene conto della non linearità del problema (figura 4.12).

Usando sempre l'esempio precedente,

$$f(u) = 2 - u \cdot e^u = 0$$

identifico la parte non lineare e^u ($=k_{NL}$), linearizzo nell'intorno di un determinato u_0 ($=k_{LIN}$), definisco la nuova variabile x per cui:

$$k(x) = (1 - x)k_{LIN} + xk_{NL}$$

risolvo partendo da u_0

$$f(u) = 2 - k(x)u$$

con $x = 0$, quindi funzione lineare sempre risolvibile. Incremento poi progressivamente x fino ad arrivare a 1, cioè la funzione originaria. Il pregio di questo metodo è che parte da una funzione lineare sempre risolvibile, è quindi un buon metodo adatto anche a risolvere equazioni fortemente non lineari.

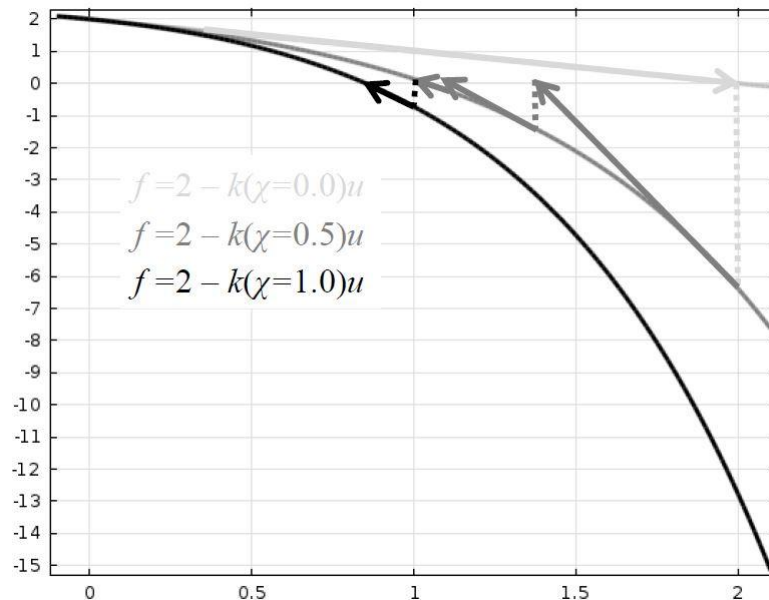


Figura 4.12: effetto della non linearità progressiva

Come già accennato precedentemente esistono due categorie di solutori, quelli diretti (MUMPS, PARDISO, SPOOLES), che computazionalmente eseguono un solo grande step per raggiungere la soluzione, molto robusti, ma poco gestibili per grossi modelli, soprattutto se tridimensionali, e quelli iterativi (GMRES, FGMRES, BiCGStab, Conjugate Gradients), che meglio si adattano a modelli di grandi dimensioni (quindi anche tridimensionali). La quantità di memoria/utilizzo processore che questi metodi utilizzano è molto a vantaggio di quelli iterativi, come mostrato nella figura 4.13.

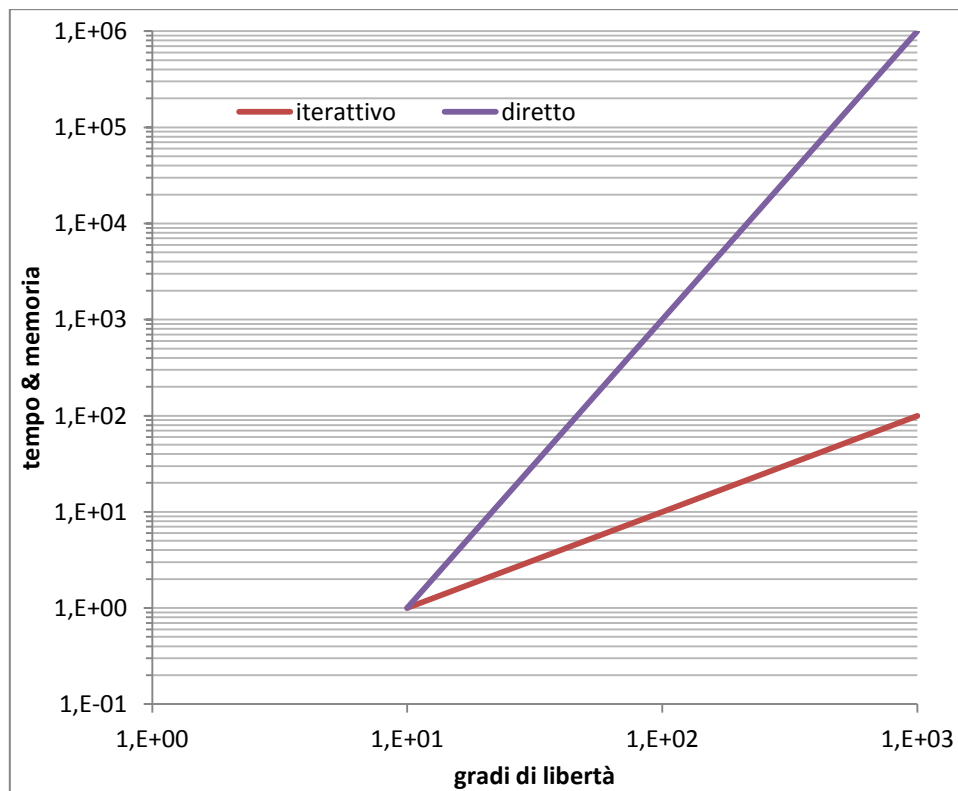


Figura 4.13: andamento del tempo di elaborazione e della memoria impiegata in funzione del numero dei gradi di libertà con i due differenti metodi

4.3 Simulazioni transitorie

Nel caso di simulazioni non stazionarie, cioè dove una grandezza varia nel tempo, il processo di risoluzione è, ovviamente, dipendente dal tempo. Considerando un'equazione a una incognita, del tipo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u = 0$$

con u_0 pari a 1. Partendo dalla condizione iniziale si prende in considerazione una soluzione lineare (figura 4.14); da questa si prende uno step temporale (Δt), verificando quale sia l'errore (ε).

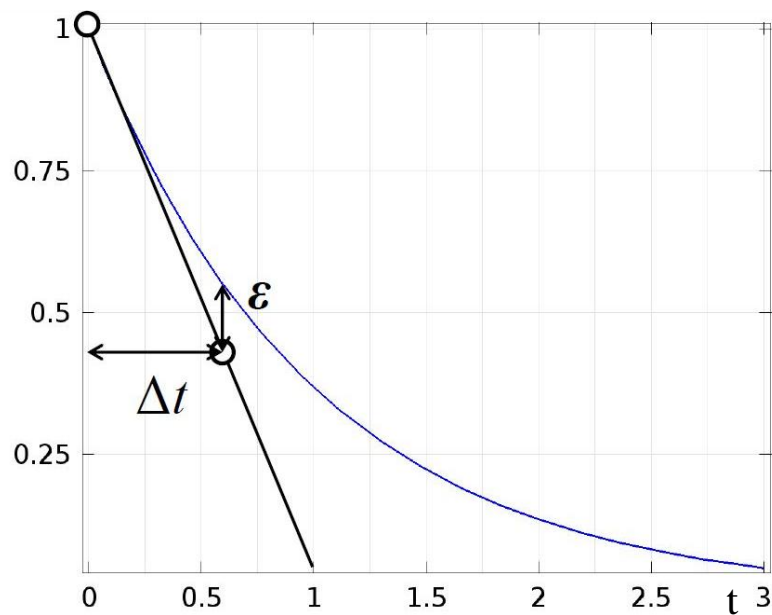


Figura 4.14: linearizzazione della soluzione transitoria e errore con un dato time step

Se l'errore ε risulta essere troppo grande, si diminuisce lo step temporale in maniera da diminuire l'errore. Fatto ciò si prosegue prendendo come condizione iniziale il risultato del tempo precedente. Per migliorare l'accuratezza del risultato e per diminuire il tempo di elaborazione il valore della grandezza che deve essere calcolata è funzione dei valori trovati precedentemente e dei time steps utilizzati (figura 4.15).

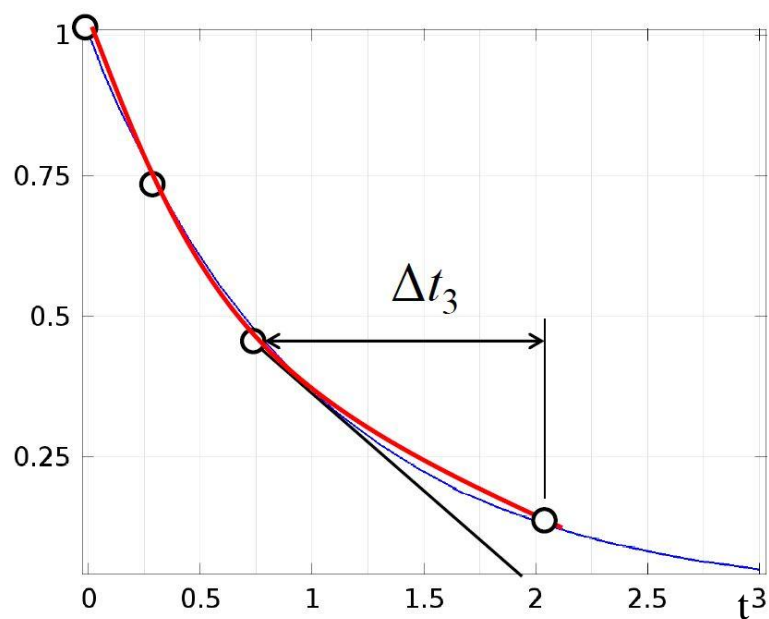


Figura 4.15: andamento dei time step successivi

La dimensione dei time steps è strettamente correlata al tipo di equazione che dovrò risolvere. Immaginiamo di avere una equazione del tipo

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u = f(t)$$

dove $f(t)$ è pari a 0 fino a $t=3$ e poi passa istantaneamente a 1 (figura 4.16 linea blu).

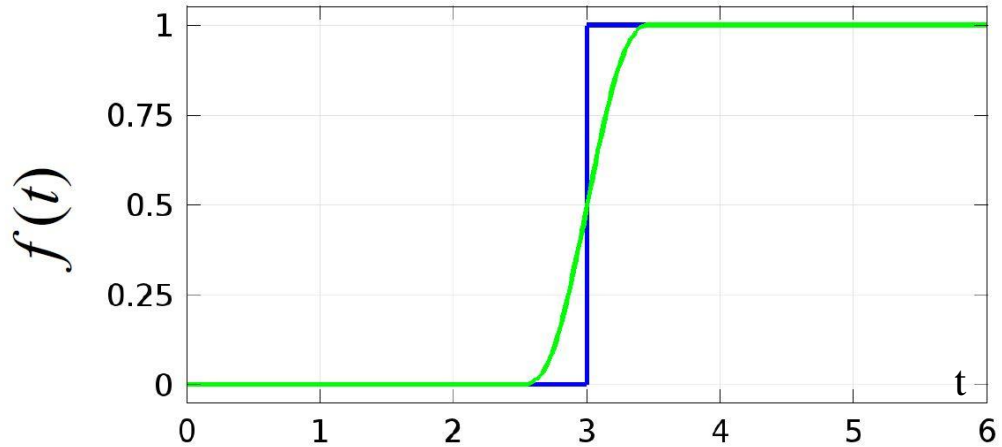


Figura 4.16: andamento di $f(t)$ reale e modellato

I time steps intorno al valore 3 saranno piccolissimi e quindi il tempo di elaborazione sarà molto elevato. Se si considera invece la linea verde della figura 4.16, cioè una linea continua, derivabile e continua in tutto il suo dominio le scansioni temporali saranno più rade e quindi il tempo di risoluzione più basso. La soluzione trovata sarà quindi quella mostrata in figura 4.17 (linea verde), confrontata con la soluzione reale (linea blu).

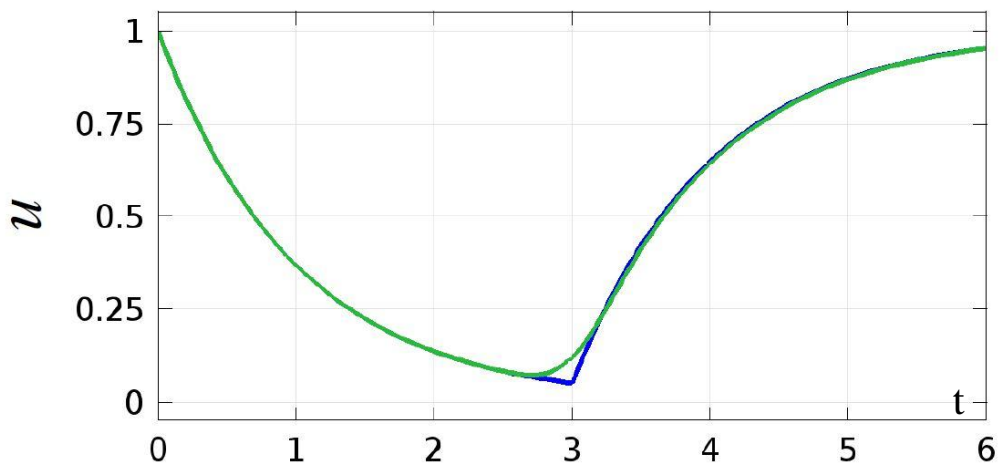
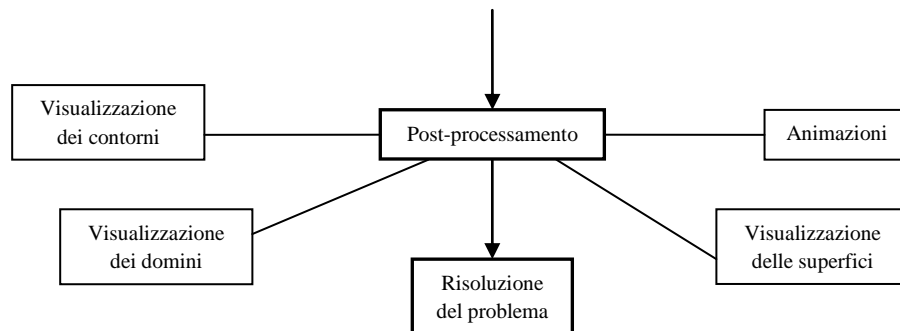


Figura 4.17: soluzione dell'equazione reale e modellata

In linea di massima i time steps sono piccoli all'inizio della elaborazione, per poi diventare sempre più grandi. Il time step massimo automatico è pari al 10% del tempo finale della simulazione, cioè se la simulazione ha come range di tempo da 0 a 1000 secondi, il time step massimo è pari a 100 secondi.

Per migliorare l'accuratezza della simulazione occorre quindi diminuire la tolleranza relativa e assoluta e provare manualmente a rimpicciolire sempre di più i time steps. Per quanto possibile bisogna evitare che ci siano bruschi cambiamenti delle proprietà fisiche dei materiali, facendo in modo che le funzioni che le descrivono siano continue in tutto l'intervallo, e che possibilmente siano continue anche le loro derivate prime.

Capitolo 5: post-processamento



In questo capitolo ci occuperemo della visualizzazione dei risultati che derivano dalla fase del solutore. Oramai tutti i software di simulazione numerica offrono una grande varietà di possibilità per questa operazione e COMSOL Multiphysics non è da meno (grafici a colori, campi vettoriali, particle tracing, curve isovalore, settori, ecc). Questo tipo di visualizzazioni rendono possibili dettagliate osservazioni, sia nello spazio che nel tempo, impossibili da fare, sia per le limitazioni sperimentali date dalle prove stesse che per la impossibilità di non perturbare il sistema effettuando la misura.

5.1 Padella

In questo modello si è voluto simulare il riscaldamento di una padella di alluminio posta su una piastra elettrica riscaldante per valutare se un approccio di questo tipo potesse essere impiegato per ben simulare la cottura di matrici alimentari. Il modello è stato sviluppato per step a crescente complessità.

Il primo stadio è stato quello di valutare la padella vuota e come si distribuisce la temperatura sulla sua superficie (figura 5.1). Questa visualizzazione mi dà la mappa della temperatura nello spazio.

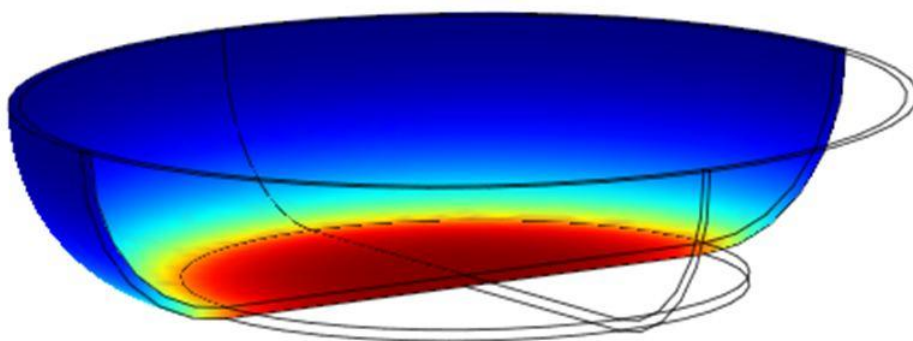


Figura 5.1: distribuzione della temperatura sulla padella

In alternativa è possibile utilizzare una visualizzazione per evidenziare l'andamento della temperatura, in determinati punti della padella, nel tempo. Si possono così, ad esempio, confrontare i dati del modello con i dati sperimentali ottenuti per mezzo di termocoppie. In figura 5.2 si vede l'andamento della temperatura dei punti K6, K7 e K10 sperimentali (linee continue) confrontati con quelli modellati (linee tratteggiate).

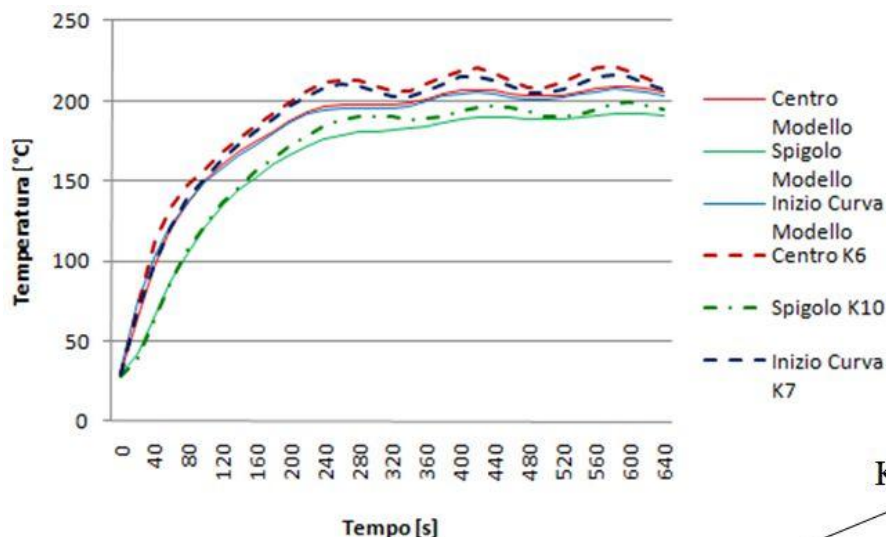
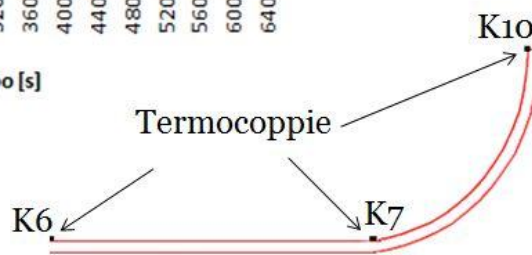


Figura 5.2: andamento temperatura sperimentale (tratteggiata) e simulata (continua)



Le due differenti visualizzazioni mostrano aspetti diversi dello stesso fenomeno. Nel primo caso ho una mappa spaziale della distribuzione della temperatura sulla superficie della padella, mentre nel secondo ho l'evoluzione della temperatura nel tempo. Si può quindi, per esempio, verificare come la distribuzione della temperatura sia omogenea sul fondo e poi progressivamente decresca sui lati, oppure confrontare i dati simulati con quelli sperimentali.

5.2 La cassetta DoppioFondo Masi

Come già visto in precedenza, questo supporto dovrebbe favorire il cambiamento della direzione del flusso di aria da orizzontale a verticale. Per fare ciò la cassetta è stata progettata con un doppio fondo. All'interno di questo doppiofondo sono presenti dei setti che costringono l'aria a seguire un determinato percorso in modo tale che avvenga il cambiamento di direzione. In figura 5.3 è mostrato il campo delle velocità che si avrebbe con aria proveniente dalla sinistra della figura alla velocità di 0.12 m/s e con 4

cassette impilate l'una sull'altra. Da questa immagine in realtà non si capisce molto bene se questo cambiamento di direzione ci sia oppure no, quindi cambiando visualizzazione e evidenziando solo il campo di velocità in direzione perpendicolare al flusso dell'aria, si ha l'immagine proposta in figura 5.4.

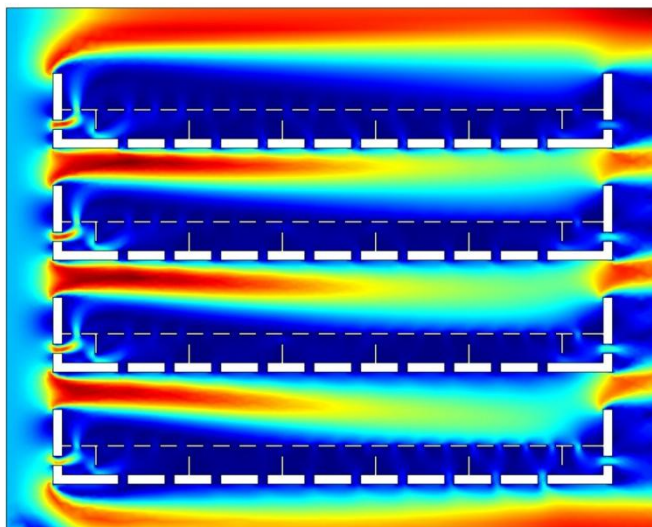


Figura 5.3: campo della velocità della cassetta doppiofondo

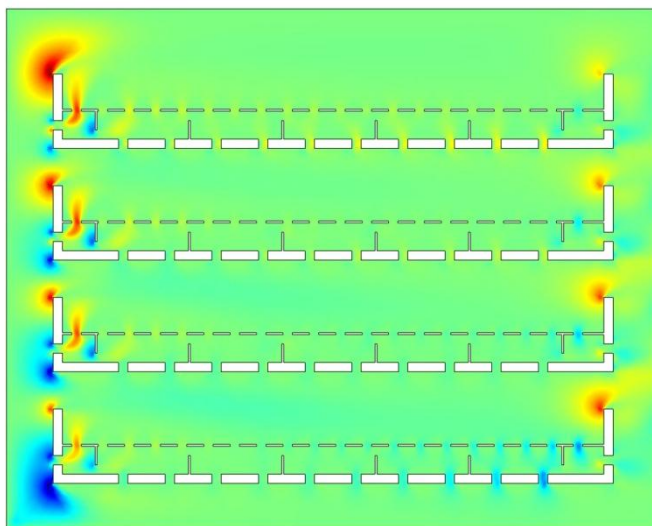


Figura 5.4: campo della velocità in direzione y della cassetta doppiofondo

Le due immagini vanno lette in maniera differente. La prima (figura 5.3) mostra il campo bidimensionale della velocità dell'aria, la gradazione di colore dal blu al rosso indica la minore o maggiore velocità (da 0 m/s a circa 0.7 m/s). Nella seconda immagine (figura 5.4), che rappresenta la velocità secondo una sola direzione (y) il viraggio di colore da blu a rosso indica il verso in cui questa velocità è diretta. Nel nostro caso una velocità nulla è

indicata dal verde; una velocità verso l'alto (secondo l'asse y), con intensità crescente, dal giallo al rosso; e una direzione verso il basso (contro l'asse y), sempre con intensità crescente, dall'azzurro al blu.

5.3 Cottura del biscotto

Nel caso di problemi accoppiati si possono visualizzare in uno stesso grafico informazioni differenti. Nel caso della modellazione della cottura del biscotto, per esempio, è possibile vedere in uno stesso grafico la distribuzione della temperatura, sia della camera che del biscotto, la fluidodinamica dell'aria all'interno della camera di cottura e le linee di isoumidità all'interno del biscotto (figura 5.5).

La figura 5.5 mostra, alla fine della simulazione (4500 secondi, pari a 75 minuti), una parte della geometria del modello, la temperatura all'interno del biscotto nella camera di cottura è visualizzata attraverso i differenti colori; il campo di velocità dell'aria mediante le frecce nere, le quali indicano la direzione orientata e l'intensità del vettore; l'umidità del biscotto attraverso le linee curve presenti all'interno della geometria del biscotto.

Time=4500 Surface: Temperature (degC) Contour: Concentration (mol/m³) Arrow Surface: Velocity field

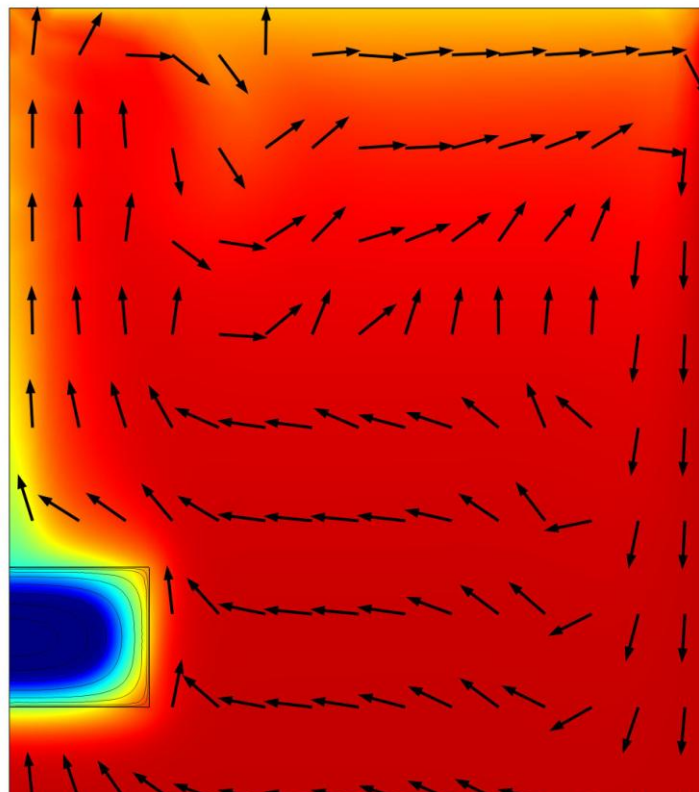


Figura 5.5: biscotto e camera di cottura con differenti informazioni visualizzate

5.4 Precipitazione tartarica

Nel caso della precipitazione tartarica è stato utilizzato un tipo di visualizzazione per identificare se le particelle precipitate venissero a contatto o meno con le pareti refrigerate e quindi ci fosse la possibilità che queste si depositassero. Questa visualizzazione avviene ipotizzando di rilasciare delle particelle, con caratteristiche impostabili dall'utente, all'interno della massa del vino. È possibile a questo punto tracciare le traiettorie delle varie particelle sottoposte alle forze che sono in gioco (in questo caso la forza di gravità e la forza di inerzia del fluido agitato da un agitatore meccanico). Nella figura 5.6 viene mostrata la griglia dove si ha il rilascio delle particelle e nella figura successiva (5.7) il risultato dopo 10 secondi di agitazione.

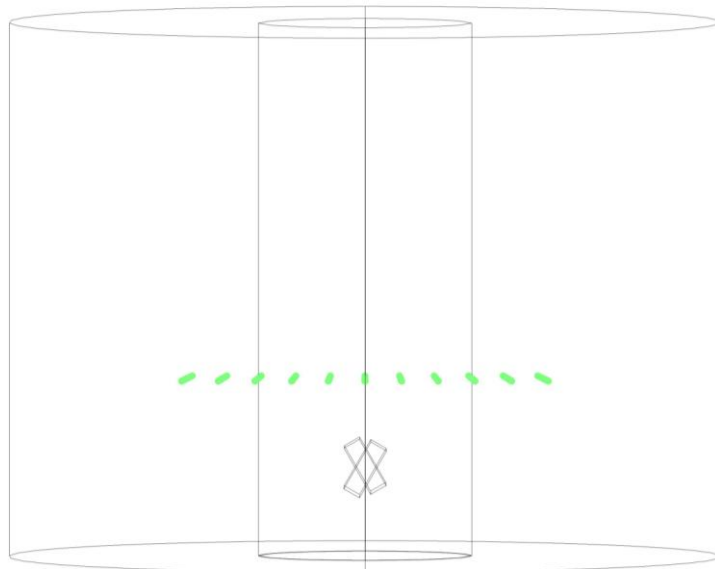


Figura 5.6: griglia di rilascio delle particelle del particle tracing

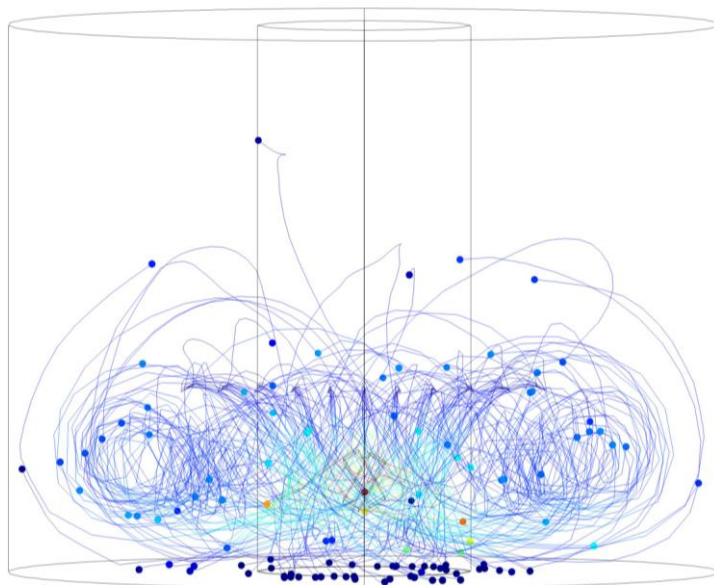


Figura 5.7: traiettoria delle particelle dopo 10 secondi di agitazione

Capitolo 6: risultati e validazione del modello

Una volta che il modello è stato elaborato, la verifica dei risultati è doverosa. Le prove sperimentali svolte devono concordare con le simulazioni effettuate e solo in questo caso si può dire di aver validato un modello.

6.1 Biscotto

6.1.1 Trasferimento materia

Le prove effettuate riguardo l'umidità del biscotto nei vari settori verificano il trasferimento di materia dall'impasto all'aria della camera di cottura. La figura 6.1 mostra le differenze tra i dati sperimentali e quelli derivanti dalla modellazione in due settori differenti del biscotto: quello centrale (simboli vuoti) e quello laterale (simboli pieni), in funzione del tempo di cottura.

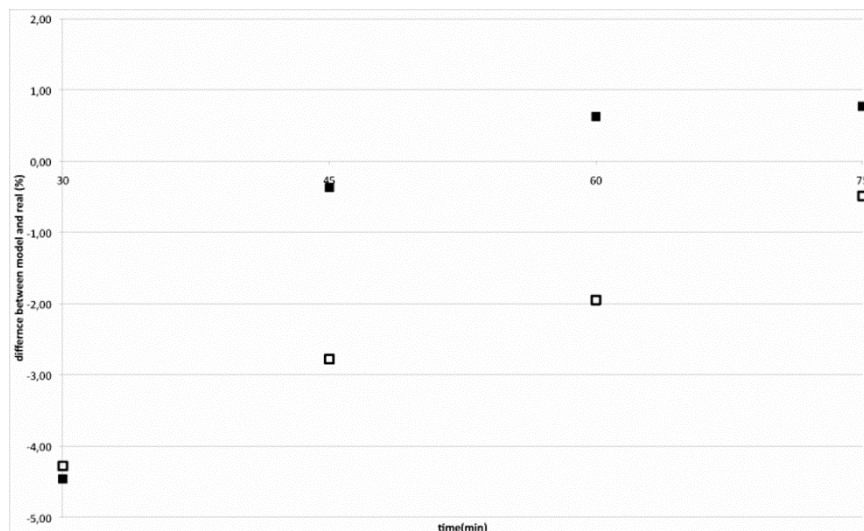


Figura 6.1: differenze tra dati sperimentali e simulati in settori differenti del biscotto

La differenza che si riscontra al termine della simulazione è, in entrambi i casi, inferiore al punto percentuale, con un errore medio percentuale relativo, definito da:

$$e \text{ (\%)} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|c_{\text{exp}} - c_{\text{mod}}|}{c_{\text{exp}}} \right) = 15.2\%$$

dove c_{exp} è la massa di acqua sperimentale, c_{mod} quella del modello e n è il numero delle osservazioni, pari a 4.

6.1.2 Trasferimento di calore

L'evoluzione della temperatura all'interno del biscotto è stata misurata per mezzo di termocoppie poste nell'impasto, con tempo di acquisizione ogni 10 secondi. La figura 6.2 mostra l'andamento della temperatura simulata nelle tre posizioni in cui sono state posizionate le termocoppie per le prove sperimentali.

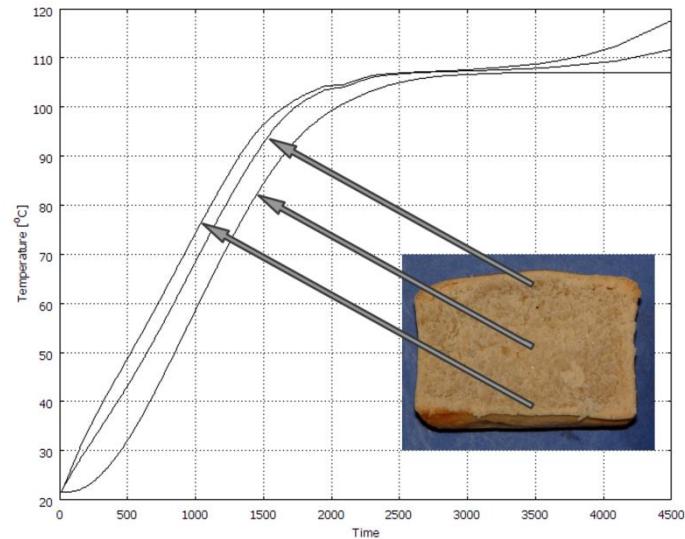


Figura 6.2: andamento della temperatura simulata in tre posizioni all'interno del biscotto

Anche in questo caso è possibile definire l'errore medio percentuale relativo, definito come in precedenza, che è 0.46% per la posizione centrale, 0.75% per la posizione più alta, 0.63% per la posizione più bassa. In figura 6.3 è mostrato a titolo di esempio, ma con andamenti assolutamente analoghi per le altre posizioni, il confronto tra dati sperimentali e dati simulati della posizione centrale.

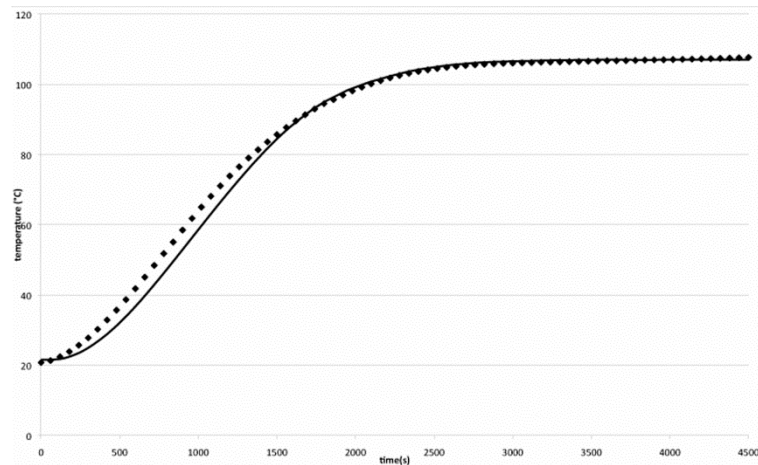


Figura 6.3: confronto temperatura tra dati sperimentali e modellati nel centro del biscotto

6.1.3 Fluidodinamica

Come già evidenziato nei capitoli precedenti il campo della velocità all'interno della camera di cottura è stato calcolato. Questo è un tipico esempio in cui la misurazione della grandezza fisica attraverso delle prove sperimentali è di complessa realizzazione, e comunque non si ha la certezza di non perturbare il sistema con la misurazione stessa. Si parla di una camera di cottura a convezione naturale, quindi la velocità dell'aria all'interno di questa è molto limitata, dell'ordine di pochi centimetri al secondo. In figura 6.4 è mostrata la mappa delle velocità, che raffigura la teorica configurazione di una convezione naturale.

Time=4500 Arrow Surface: Velocity field

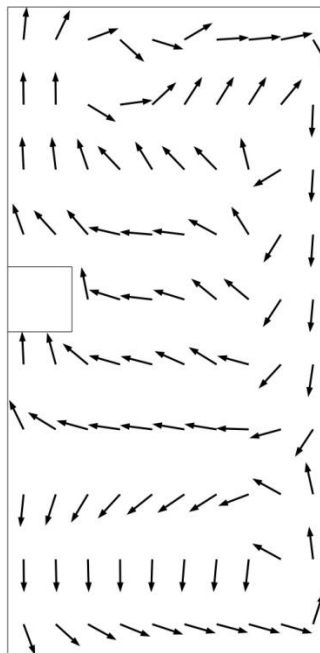


Figura 6.4: campo di velocità nella camera di cottura

6.2 Supporti Masi

6.2.1 Fluidodinamica

Come visto in precedenza lo studio per la Masi Agricola è incentrato sulla realizzazione di un “super supporto” che esaltasse gli aspetti positivi dei vari supporti che sono stati studiati e riducesse invece gli aspetti negativi. Uno dei più importanti argomenti di discussione sui supporti riguarda la loro capacità di non alterare la fluidodinamica dell’aria che li lambisce. In altre parole bisogna verificare che all’interno della catasta di cassette, per permettere l’appassimento, ci sia un costante rimescolamento dell’aria per evitare che la formazione di microclimi possa favorire lo svilupparsi di muffe indesiderate. Purtroppo la geometria delle cassette non favorisce questo rimescolamento. La velocità interna è così bassa che anche una ventilazione esterna forzata non riuscirebbe a garantire un adeguato flusso dell’aria. Per quanto riguarda il modello, i risultati sono stati soddisfacenti, rispecchiando le condizioni sperimentali rilevate. In figura 6.5 viene mostrato il campo di velocità che si sviluppa all’interno di una catasta di cassette di legno, con aria proveniente dalla faccia anteriore sinistra alla velocità di 0.12 m/s.

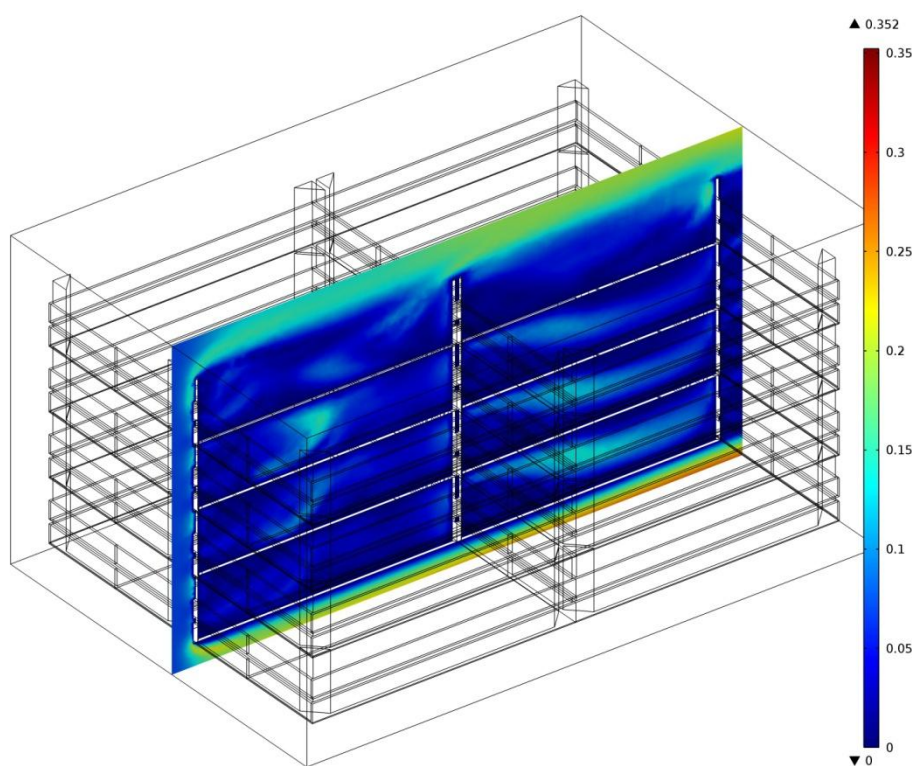


Figura 6.5: campo di velocità all’interno di una catasta di cassette di legno

Come per i dati sperimentali, anche per la simulazione l'aria risulta essere pressoché ferma all'interno della catasta, con possibile formazione di microclimi indesiderati. Alcuni supporti si comportano in maniera differente, evitando di modificare in maniera significativa il flusso dell'aria entrante dall'estremità sinistra. In figura 6.6 viene visualizzato il campo di velocità di questo supporto (arella di bambù).

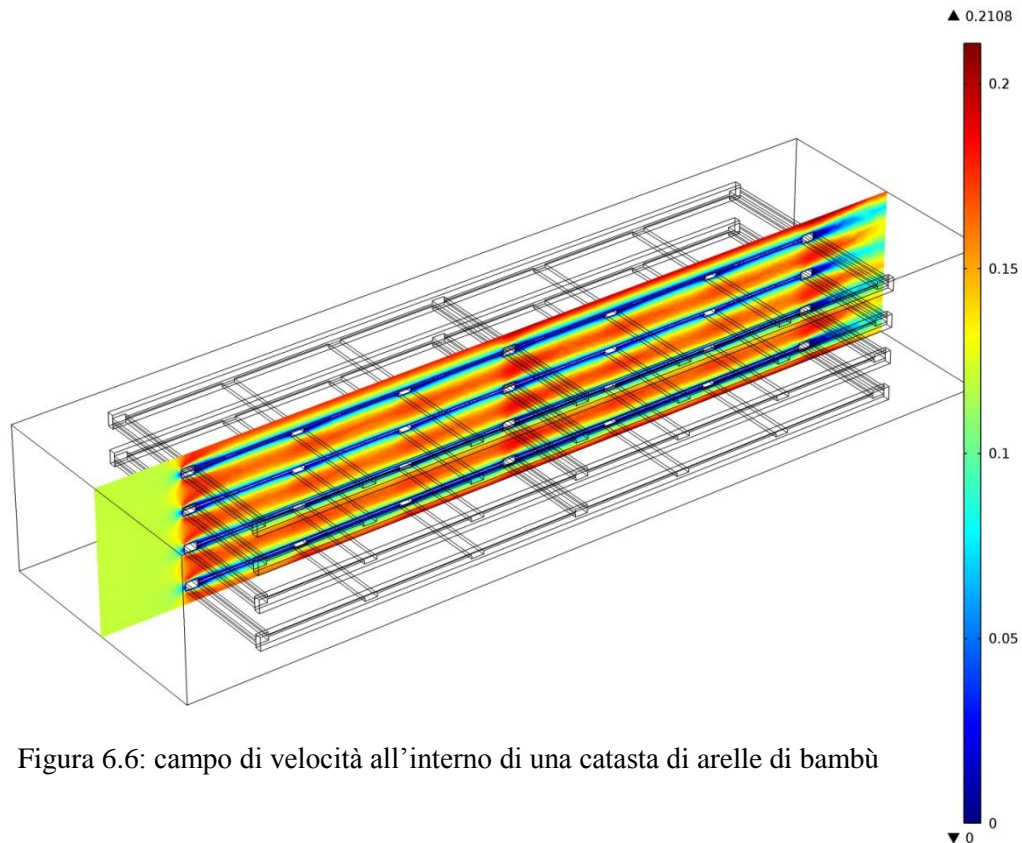


Figura 6.6: campo di velocità all'interno di una catasta di arelle di bambù

La distribuzione della velocità è evidentemente differente rispetto alla precedente, con una maggiore areazione per il supporto di bambù, che aiuta a contrastare il verificarsi di ristagni di aria.

6.3 Precipitazione tartarica

6.3.1 Reaction engineering

Questo modello si propone di simulare la precipitazione tartarica e i possibili miglioramenti che si possono approntare per questo processo. La precipitazione avviene diminuendo la temperatura del vino, in quanto così varia il coefficiente di solubilità del composto. Il primo modello è incentrato sulla reazione chimica e sulla velocità con cui questa avviene. Le specie chimiche coinvolte in questa reazione sono lo ione potassio (K^+), il tartrato acido dissociato (HT^-) e il tartrato acido di potassio (KHT). Il tartrato che

precipita viene trasformato all'interno del software nella specie S che indica pertanto la quantità precipitata. In figura 6.7 viene mostrata l'evoluzione della quantità delle differenti specie chimiche coinvolte, nel tempo.

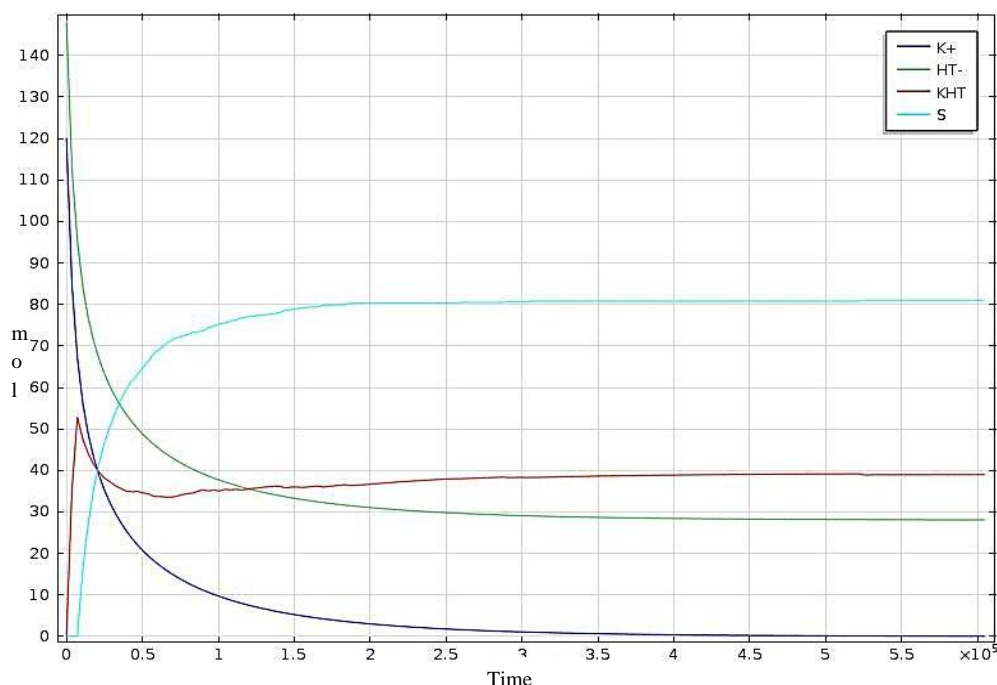


Figura 6.7: evoluzione delle specie chimiche in funzione del tempo

L'azienda agricola che ha collaborato in questo studio ha osservato che al termine della fase di stabilizzazione tartarica (della durata di una settimana) vi era la formazione, lungo le pareti interne del vaso vinario, di uno strato di bitartrato di potassio precipitato, dello spessore di 0.5 mm circa. Ipotizzando che tutto il bitartrato di potassio andasse a depositarsi sulle pareti e considerando la superficie interna del vaso vinario di 25.9 m² con un conseguente volume di precipitato di 0.0518 m³, è stato possibile calcolare il peso di tale precipitato, corrispondente a 13.59 kg. La quantità di bitartrato precipitato derivante dal modello, 81.0487 mol, è pari a 15.25 kg, con un errore percentuale relativo di circa 11%.

6.3.2 Trasferimento di calore

La reazione di precipitazione avviene indipendentemente dalla variazione della temperatura, ma con l'abbassarsi della temperatura diminuisce il coefficiente di solubilità del bitartrato, quindi i due processi sono strettamente legati. L'andamento della temperatura simulata media del vino all'interno del vaso vinario, in funzione del tempo, è mostrata in figura 6.8.

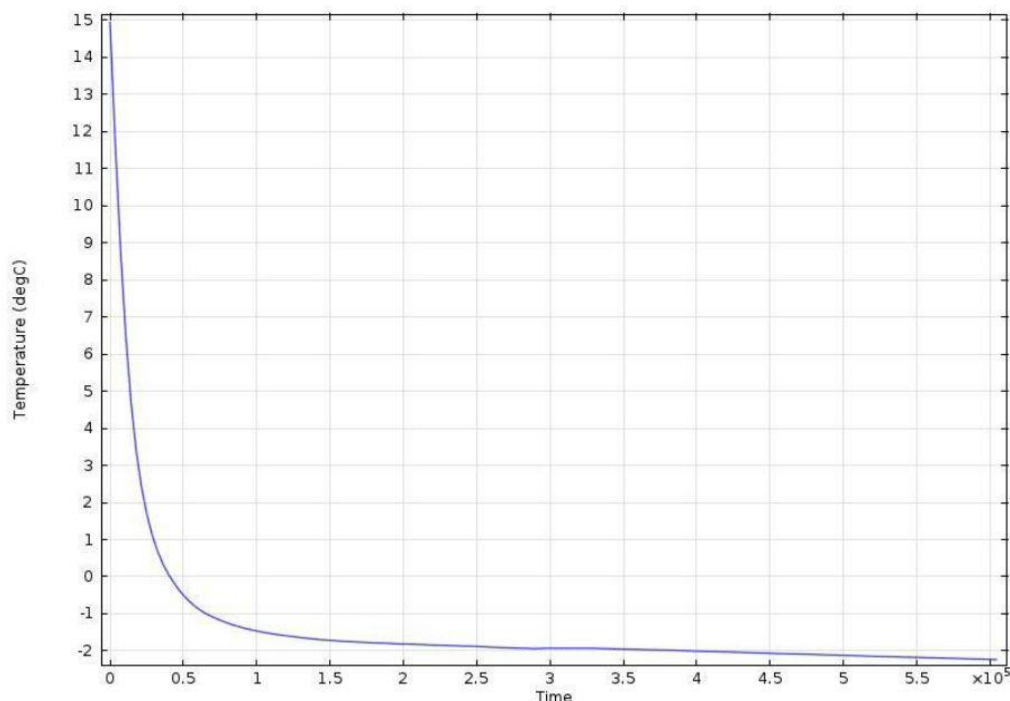


Figura 6.8: andamento della temperatura media all'interno del vaso vinario

Dopo un brusco calo della temperatura media nei primi tempi della simulazione (circa 1 giorno), questa si assesta intorno ai -2°C per il restante tempo del processo di stabilizzazione.

6.3.3 Fluidodinamica

Per descrivere i moti convettivi che si sviluppano dalla variazione di temperatura che subisce il vino durante il processo di raffreddamento e che quindi influiscono anche la trasmissione del calore, è stata effettuata un'analisi fluidodinamica. Nella figura 6.9 viene mostrato come la velocità media del fluido vari in funzione del tempo. Il lungo periodo del processo, e quindi anche della simulazione, che si protrae per una settimana, ha fatto sì che le soluzioni venissero acquisite soltanto ogni 600 secondi, quindi con una accuratezza del grafico proposto piuttosto scarsa per capire l'andamento della velocità media, soprattutto nel periodo iniziale, dove le differenze di temperatura, quindi di densità sono più rilevanti determinando un maggior movimento della massa del vino. Nella figura 6.10 viene quindi mostrato l'andamento della velocità nei primi 1000 secondi del processo, con un dettaglio ovviamente maggiore, essendo l'acquisizione, in questo caso, ogni 10 secondi. In entrambi i grafici risulta chiaro che con l'andare del tempo e l'uniformazione della temperatura la velocità tende a diminuire.

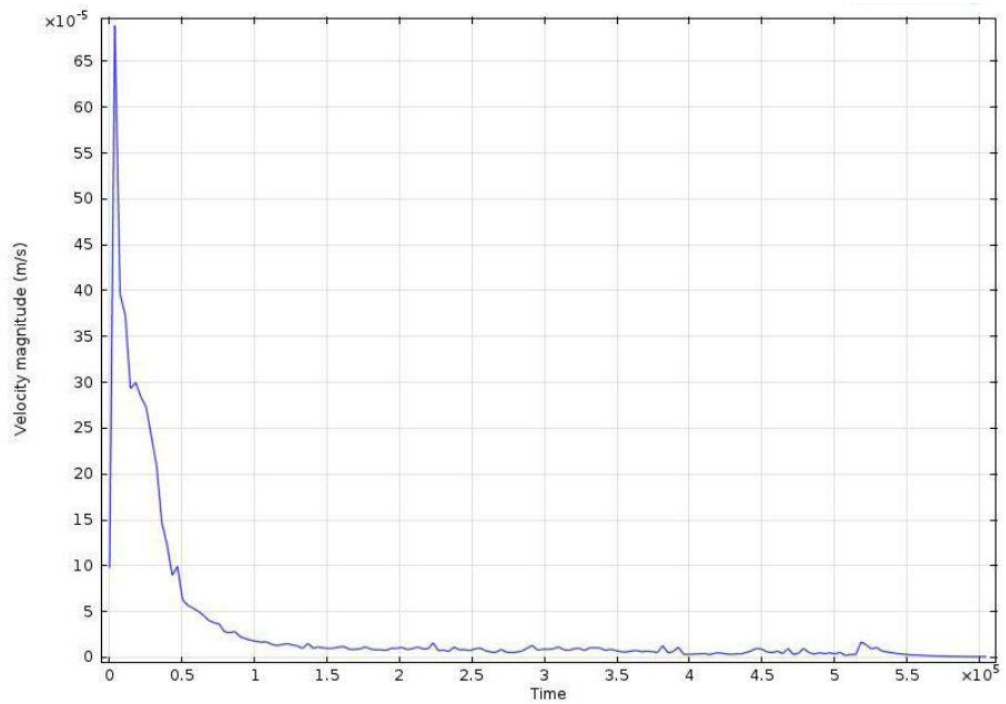


Figura 6.9: andamento della velocità media all'interno del vaso vinario

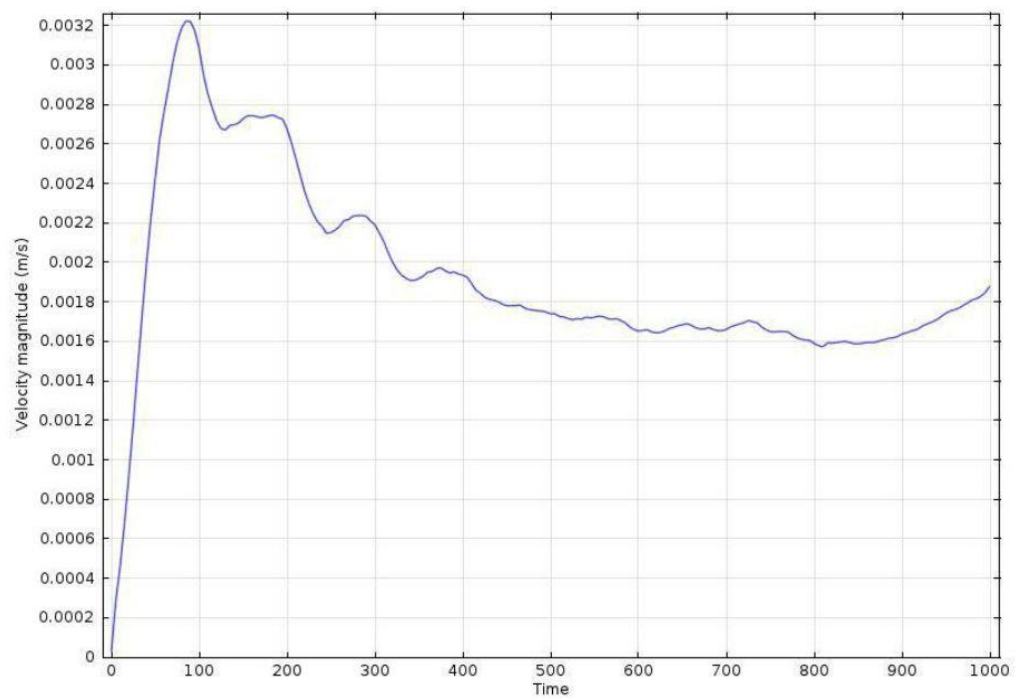


Figura 6.10: velocità media all'interno del vaso vinario nei primi 1000 secondi

6.4 Padella

6.4.1 Trasferimento di calore: problemi relativi alla matrice alimentare

Nel capitolo 5.1 è già stato descritto il primo degli step per arrivare alla definizione del modello finale. Esso riguardava la conduzione del calore da una piastra riscaldante ad una padella di alluminio. La figura 6.11 illustra il confronto tra l'evoluzione della temperatura dei dati sperimentali e di quelli modellati, che danno luogo ad un errore relativo percentuale medio per ogni coppia di dati pari al 5.31% per la posizione centrale, 2.98% per la posizione di inizio curvatura e del 2.14% per lo spigolo della padella.

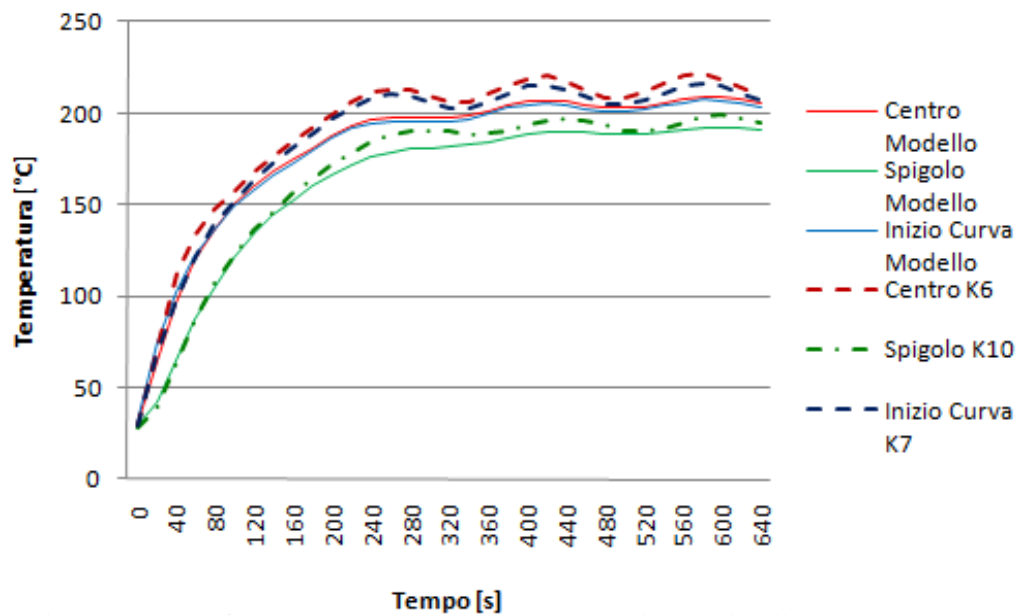


Figura 6.11: confronto temperature modellate e sperimentali della padella

Un secondo passaggio è stato fatto inserendo all'interno della padella un disco di alluminio in modo che simulasse del cibo che stava per essere cotto. La figura 6.12 mostra la distribuzione della temperatura all'interno del disco.

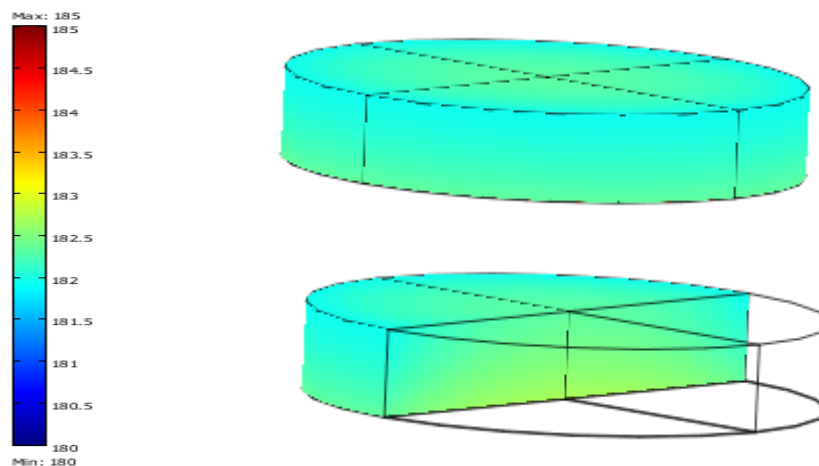


Figura 6.12: distribuzione della temperatura all'interno del disco di alluminio

Tre termocouple sono state posizionate in modo da misurare la temperatura in differenti punti, come da fig. 6.13.



DISCO DI ALLUMINIO

Figura 6.13. posizionamento delle termocouple nel disco di alluminio

La figura 6.14 mostra l'andamento della temperatura dai dati sperimentali e dal modello sviluppato. L'andamento delle curve è pressoché sovrapponibile, con un errore relativo percentuale medio per le tre posizioni pari al 1.81% per la termocoppia K7, 6.09% per la termocoppia K8 e 5.50% per la termocoppia K9.

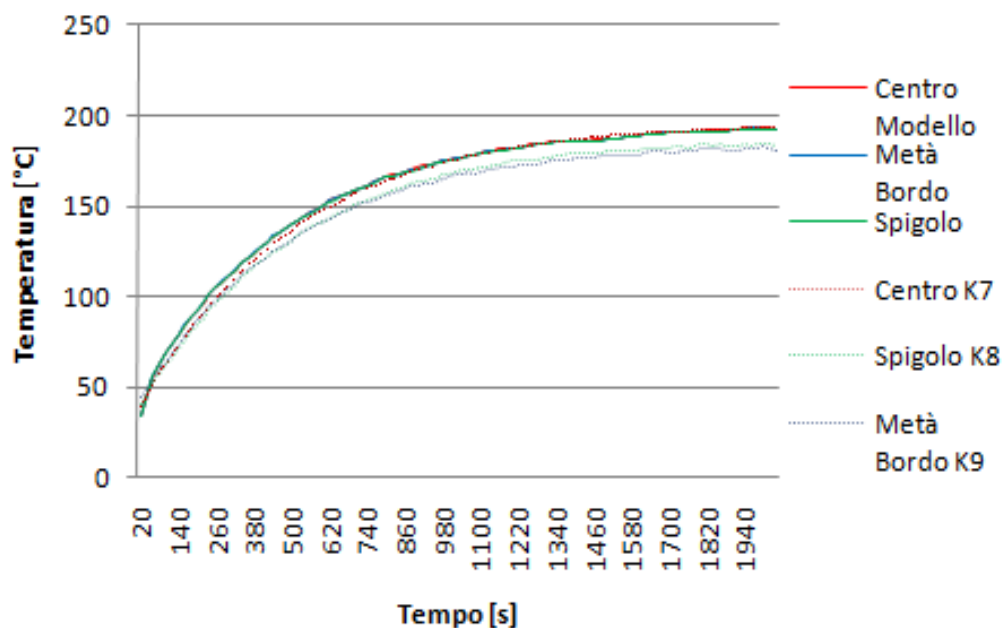


Figura 6.14: confronto tra temperature sperimentali e modellate del disco di alluminio

L'ultimo step è stato sviluppato inserendo un disco di un materiale organico al posto del disco di alluminio. La scelta di una matrice alimentare da inserire nell'analisi modellistica è stata presa secondo i seguenti criteri: proprietà termiche e composizione note, omogeneità della struttura e facilità di reperibilità. L'alimento modellato è stato, pertanto, un disco di patata. Questo modello, vista la difficoltà della modellazione di matrici alimentari, è a sua volta diviso in due sotto-step. Il primo prevedeva un semplice riscaldamento della patata, quindi con una temperatura della piastra riscaldante pari a circa 80°C, in maniera da evitare troppi fenomeni propri

dei composti organici riscaldati ad alte temperature, mentre il secondo è stato condotto ad una temperatura di 150°C, quindi temperature più vicine a quelle utilizzate normalmente nella cottura in padella.

Per il modello a temperatura più bassa la figura 6.15 mostra il confronto tra le temperature sperimentali e quelle simulate, con un errore relativo percentuale medio pari al 12.06% per la termocoppia posta nella posizione centrale e pari al 18.38% per la termocoppia posta a metà altezza a 0.5 cm dal bordo esterno.

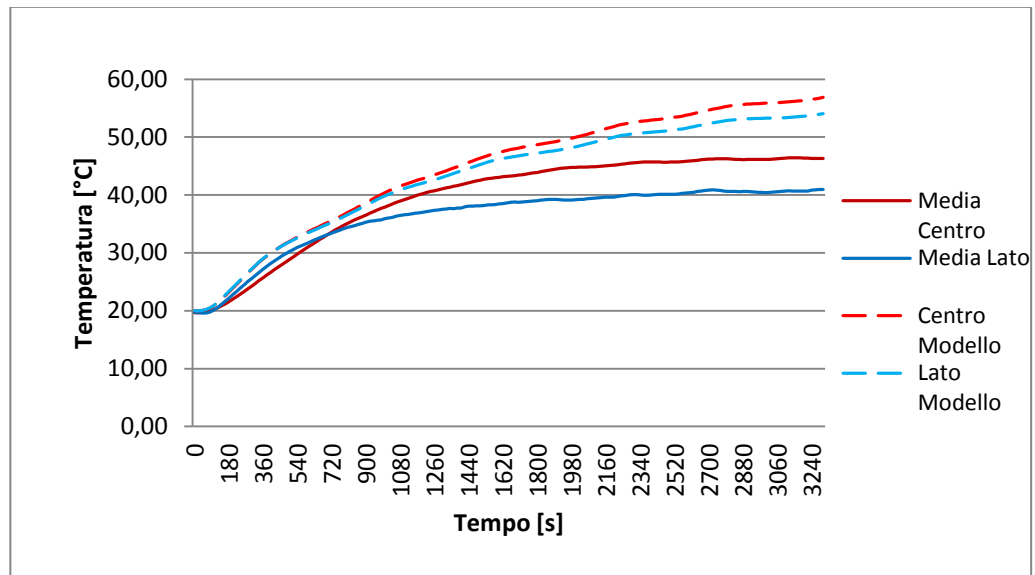


Figura 6.15: confronto tra temperature sperimentali e modellate del disco di patata riscaldata a 80°C

La figura 6.16 mostra la distribuzione della temperatura all'interno del disco di patata alla temperatura di cottura più alta. Si nota come la differenza rispetto a quello di alluminio sia netta (v. figura 6.12).

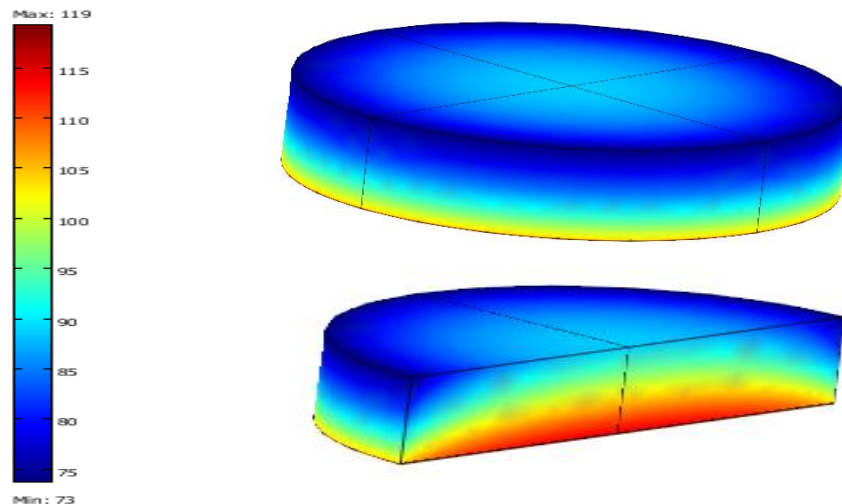


Figura 6.16: distribuzione della temperatura all'interno del disco di patata

Anche in questo caso il confronto tra le temperature ricavate dai dati sperimentali e quelle modellate è rappresentato dalla figura 6.17, che dà un errore relativo percentuale medio pari al 18.06% per la termocoppia centrale e pari al 25.51% per la termocoppia laterale.

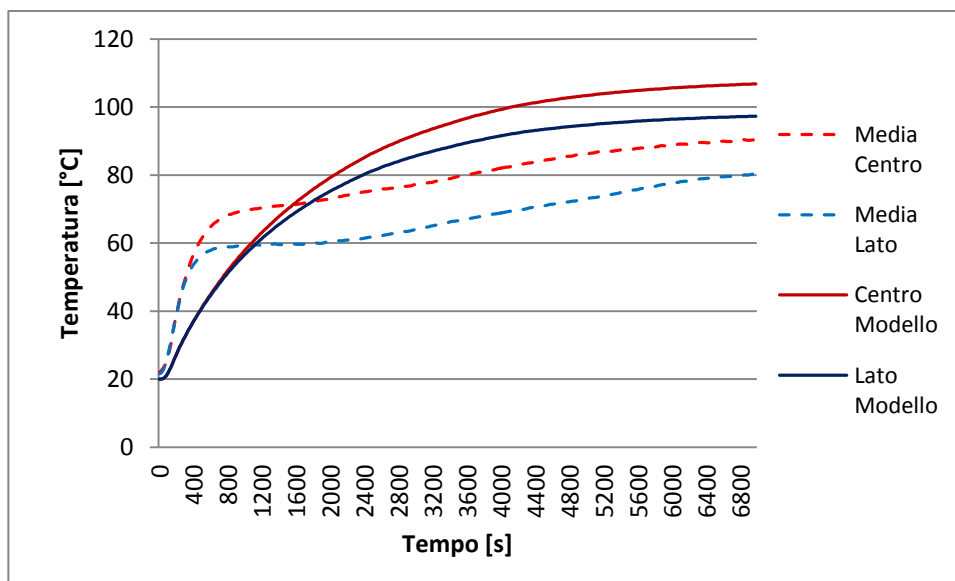


Figura 6.17: : confronto tra temperature sperimentali e modellate del disco di patata riscaldata a 150 °C

Il confronto degli errori medi tra i differenti modelli evidenzia immediatamente in che maniera una matrice dinamica come quella alimentare sia di complessa modellazione, dove in pratica lo stesso modello (disco di alluminio e di patata), con differenze solo sulle caratteristiche fisiche del disco presenta notevoli differenze.

6.5 Icepack

6.5.1 Trasferimento di calore

Il modello realizzato per Icepack vuoto è incentrato sul tempo di scioglimento della lastra di ghiaccio. Dopo un veloce decremento della temperatura interna dalla temperatura ambiente dovuta all'inserimento della lastra di ghiaccio nella scatola, c'è un incremento fino al raggiungimento della temperatura di fusione del ghiaccio, con un valore costante di circa 0 °C (figura 6.18). Il tempo totale di scioglimento della lastra di ghiaccio è di 15.8 ore, dopo di che la temperatura ritorna ad aumentare. Il modello fornisce un tempo di scongelamento di circa 17 ore, con un errore relativo percentuale, calcolato come:

$$e = \frac{|t_{exp} - t_{mod}| * 100}{t_{exp}}$$

dove il pedice *exp* significa sperimentale e *mod* modellato, è uguale a 7.6%. La figura 6.18 mostra il confronto tra le temperatura modellata e quella sperimentale della lastra di ghiaccio.

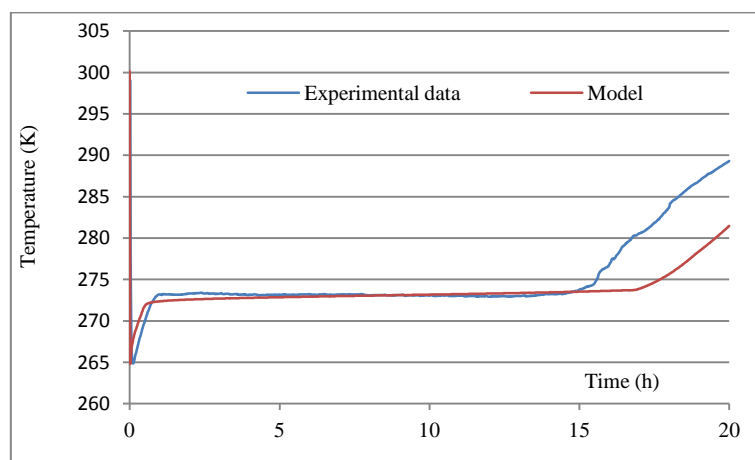


Figura 6.18: temperatura della lastra di ghiaccio

Il modello che simula la presenza dei mirtilli con la lastra di materiale omogeneo avente proprietà termo-fisiche ottenute da una media pesata delle proprietà dell'aria e dei mirtilli, si concentra sul tempo di scioglimento della lastra di ghiaccio e sulla temperatura nel punto più caldo all'interno della massa dei mirtilli. È possibile rilevare un rapido decremento della temperatura misurata del ghiaccio, seguita da un incremento fino a un plateau alla temperatura di fusione dello stesso. Il tempo totale di scioglimento è di circa 10.6 ore dal riempimento dell'Icepack. La

temperatura misurata tra i mirtilli presenta un decremento fino a circa 10 °C e poi un lento aumento. Il modello simula un tempo totale di fusione del ghiaccio di circa 9.7 ore, con un errore relativo percentuale (e) pari a 8.5%. La qualità della simulazione è data dall'errore relativo medio, il quale è definito come:

$$em(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|T_{exp} - T_{mod}|}{T_{exp}} \right)_i$$

dove n è il numero di osservazioni sperimentali. L' em della posizione centrale è pari al 1.06%. La figura 6.19 mostra il grafico della temperatura (modellata e sperimentale della lastra di ghiaccio e dei mirtilli).

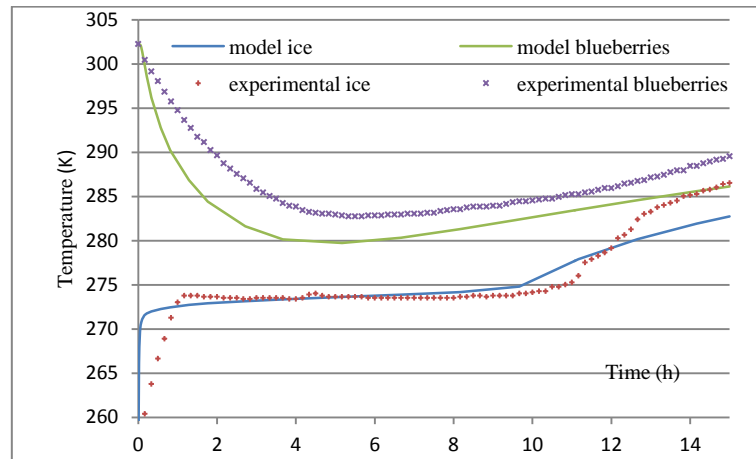


Figura 6.19: profili di temperatura del ghiaccio e dei mirtilli nel modello “lastra”

Il modello con i frutti simulati da sfere è sempre incentrato sul tempo di scioglimento della lastra di ghiaccio e sulla distribuzione della temperatura all'interno della massa di mirtilli, cercando di migliorare i risultati del modello precedente.

Il tempo di scioglimento è molto simile al tempo reale di fusione, con un errore relativo percentuale (e) molto vicino allo 0. L'errore medio relativo percentuale (em) della posizione centrale (nella massa dei mirtilli) è pari allo 0.43%, circa la metà dell'errore ottenuto con il modello prededente. La figura 6.20 mostra il profilo di temperatura del modello con i frutti simulati da sfere e dei dati sperimentali.

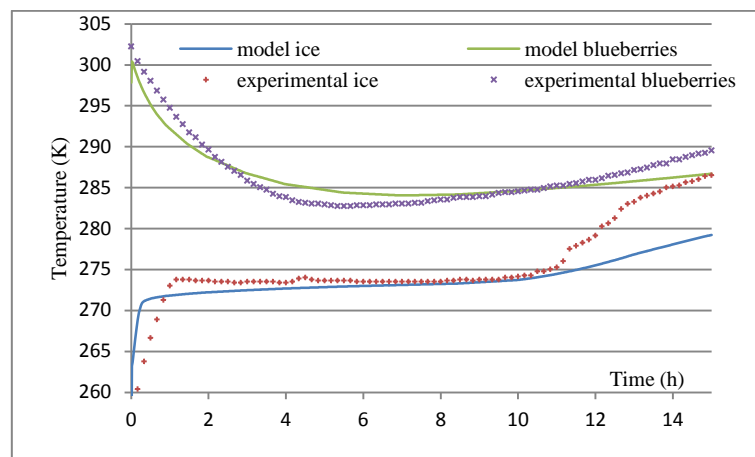


Figure 6.20: profili di temperatura del ghiaccio e dei mirtilli nel modello con i frutti simulati

Capitolo 7: ottimizzazione

In questo capitolo ci occuperemo della ottimizzazione del processo, cioè, una volta che il modello è stato validato, modificare alcune caratteristiche per migliorarne le prestazioni.

7.1 Supporti Masi

Nel modello riguardante la cassetta con il doppio fondo abbiamo già visto nei capitoli precedenti come in realtà questo doppio fondo non riuscisse a far cambiare direzione al flusso di aria, così si è pensato di ottimizzare la geometria in modo che questo fenomeno avvenisse. La configurazione di fabbrica della cassetta prevede i setti confinanti con l'esterno posti in alto, mentre gli altri sono posti in basso. Si è pensato di cambiare questa disposizione in maniera tale che tutti i setti fossero nella medesima posizione, quindi tutti in alto oppure tutti in basso. In figura 7.1 viene mostrato in che modo la geometria sia stata cambiata e qual è il risultato ottenuto.

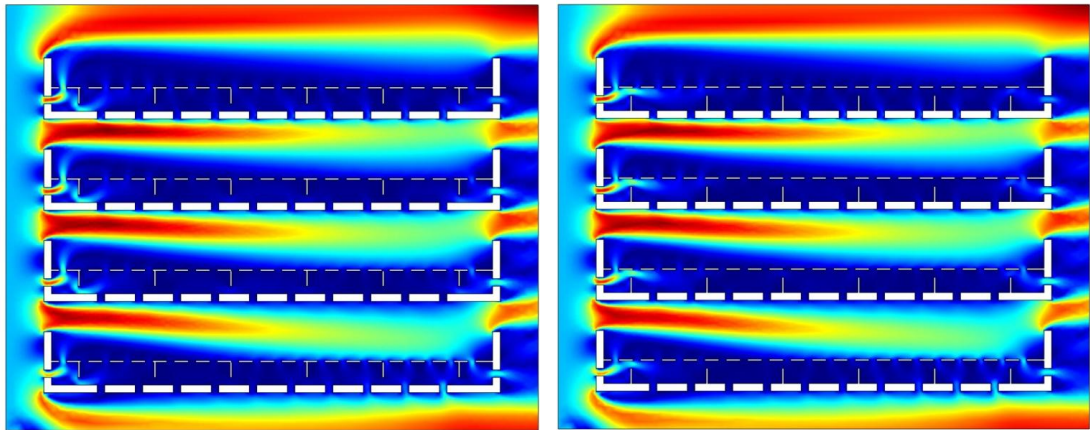


Figura 7.1: campo di velocità con setti posti in differenti posizioni

Per meglio visualizzare i cambiamenti e come questi influiscono sulla fluidodinamica, si passa alla visione della sola velocità in direzione y (figura 7.2).

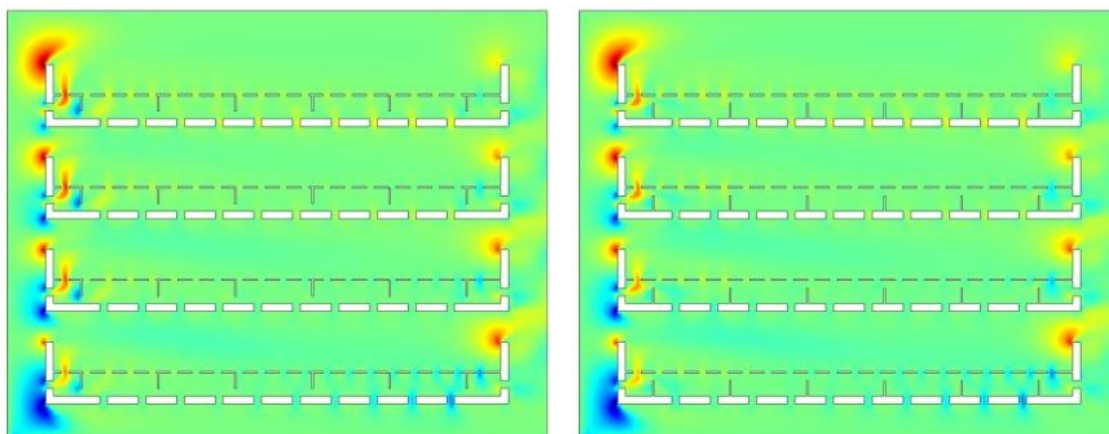


Figura 7.2: confronto della velocità in direzione y con differenti configurazioni dei setti

Per comprendere ancora meglio come l'alternativa con i setti in basso sia più vantaggiosa rispetto alle altre in termini fluidodinamici, si può rappresentare la velocità verticale (figura 7.3) a 1 millimetro di altezza rispetto all'ultima cassetta lungo tutta la sua lunghezza (linea rossa della figura 7.4). La linea blu rappresenta la geometria con la configurazione relativa ai setti in posizione bassa, la verde con la configurazione di fabbrica e la linea rossa relativa ai setti in posizione alta.

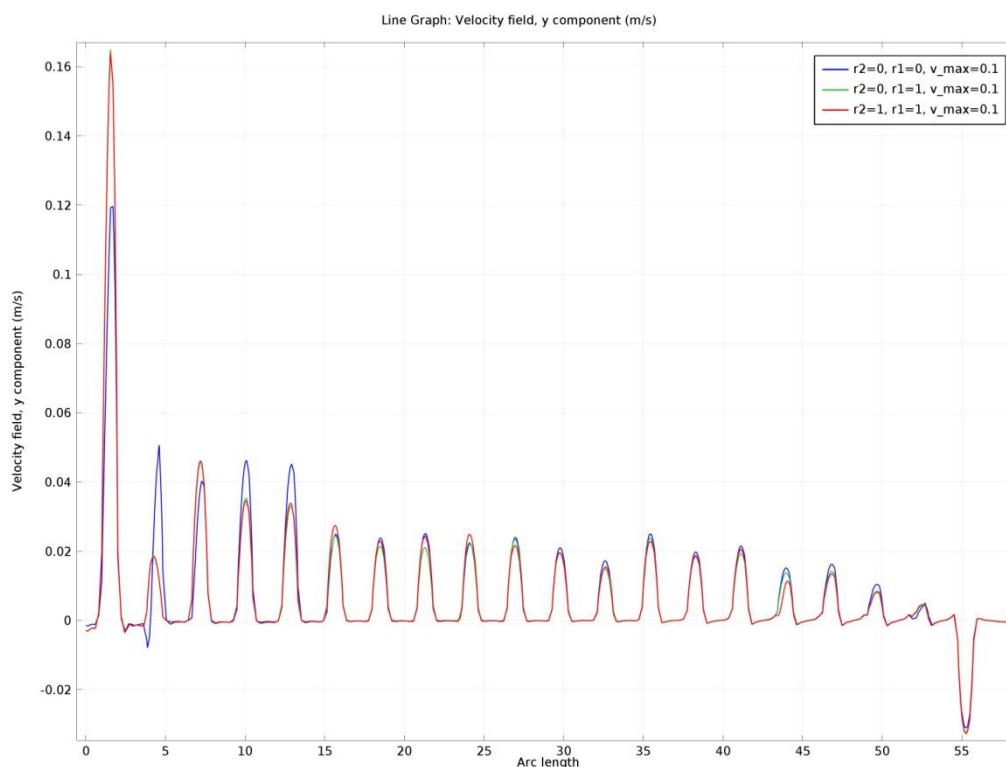


Figura 7.3: velocità asse y a 1 mm dalla superficie superiore della cassetta con velocità di 0.1m/s

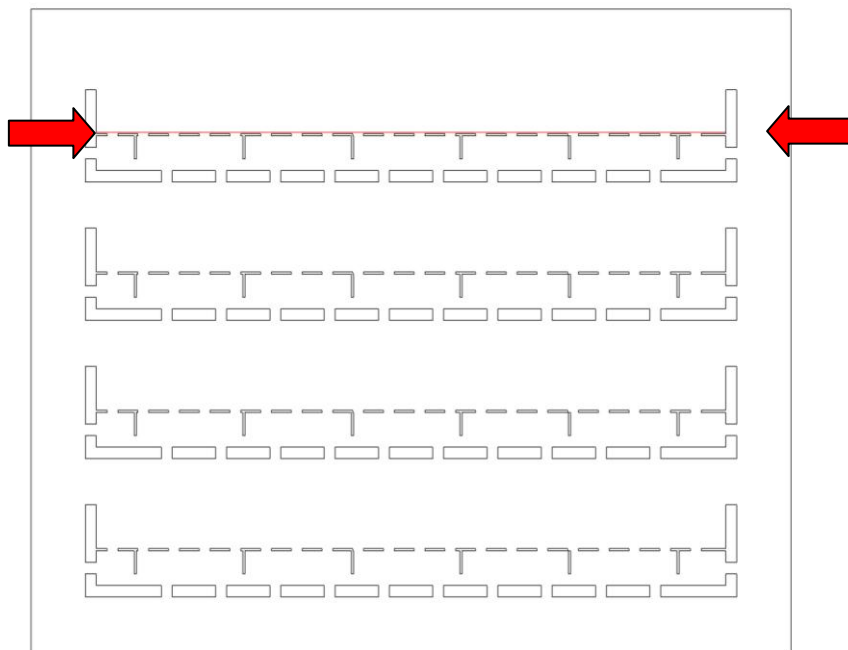


Figura 7.4: linea di riferimento per la misurazione della velocità verticale dell'aria

La linea blu è in quasi tutti i punti maggiore della verde e della rossa, quindi la configurazione con i setti posti in basso riesce a distribuire meglio il flusso di aria dalla parte inferiore della cassetta a quella superiore. Questo fenomeno è amplificato se si aumenta il flusso di aria da 0.1 m/s a 2m/s e ulteriormente a 10 m/s (figura 7.5).

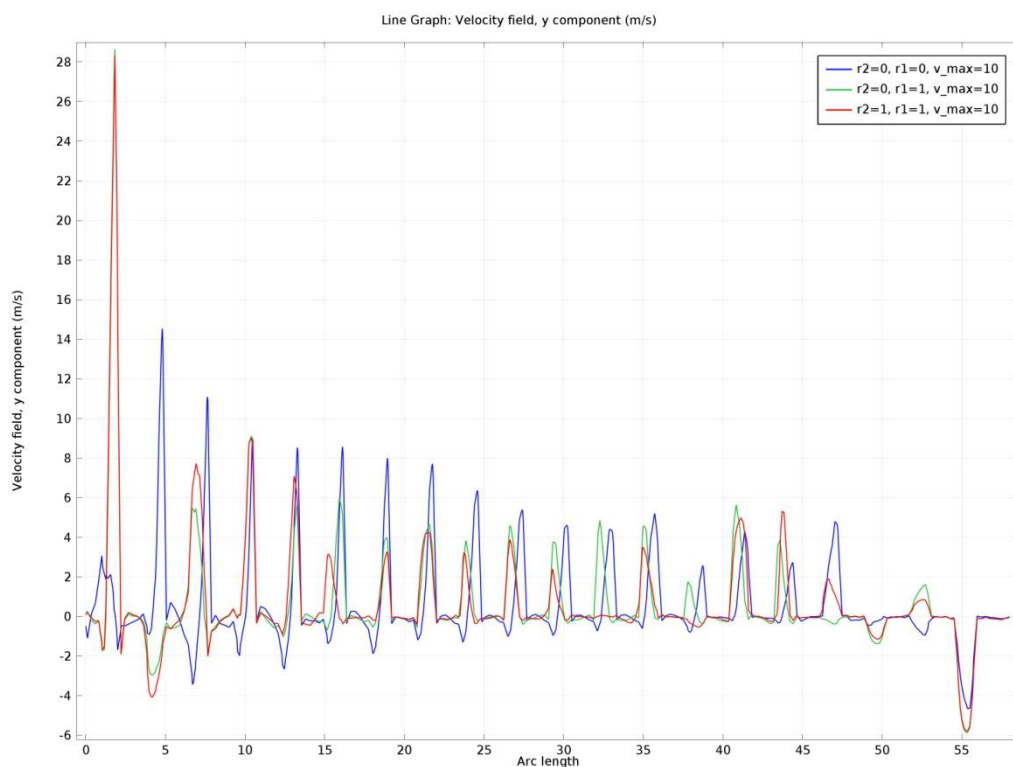


Figura 7.5: velocità asse y a 1 mm dalla superficie superiore della cassetta con velocità di 10 m/s

7.2 Precipitazione tartarica e particle tracing

Un aspetto molto complesso, fondamentale per questo processo di vinificazione, che questo modello affronta è il capire in che modo è possibile evitare che le particelle di tartrato che si stanno formando vadano a depositarsi sulle pareti del tino in modo tale da non diminuire l'efficienza dello scambio termico. Si è quindi ipotizzata un'ottimizzazione che prevedesse di dotare alle particelle un'energia cinetica sufficiente ad impedire che queste si depositassero sulle pareti laterali del tino. Questo problema è stato risolto utilizzando un modulo aggiuntivo del software, chiamato 'Particle Tracing module', il quale appunto si occupa di tracciare la traiettoria di particelle sottoposte a differenti forze. Si è quindi aggiunto un agitatore meccanico, con una velocità di rotazione di 120 giri/min all'interno del vaso vinario definendo il campo di velocità del fluido con il 'CFD Module'. Le particelle di tartrato sottoposte alla forza gravitazionale, alle forze d'inerzia del fluido in movimento e agli urti con le palette dell'agitatore, seguono la traiettoria determinata dalla componente delle forze in gioco. In figura 7.6 è mostrato il campo di velocità per mezzo di linee (streamline), a differenti tempi.

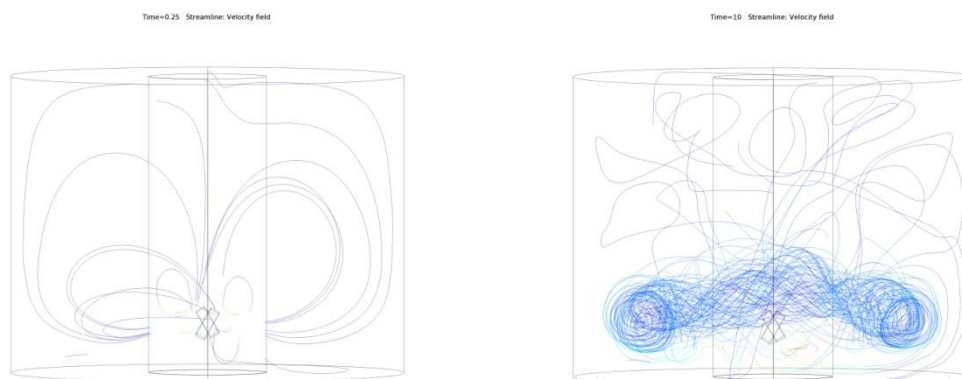


Figura 7.6: campo di velocità visualizzato con linee a due tempi di simulazione

Lo stesso risultato può essere visto attraverso un altro tipo di visualizzazione, dividendo il dominio di partenza per mezzo di cinque setti (fittizi) posti all'interno del tino di precipitazione che evidenziano il campo di velocità (figura 7.7).

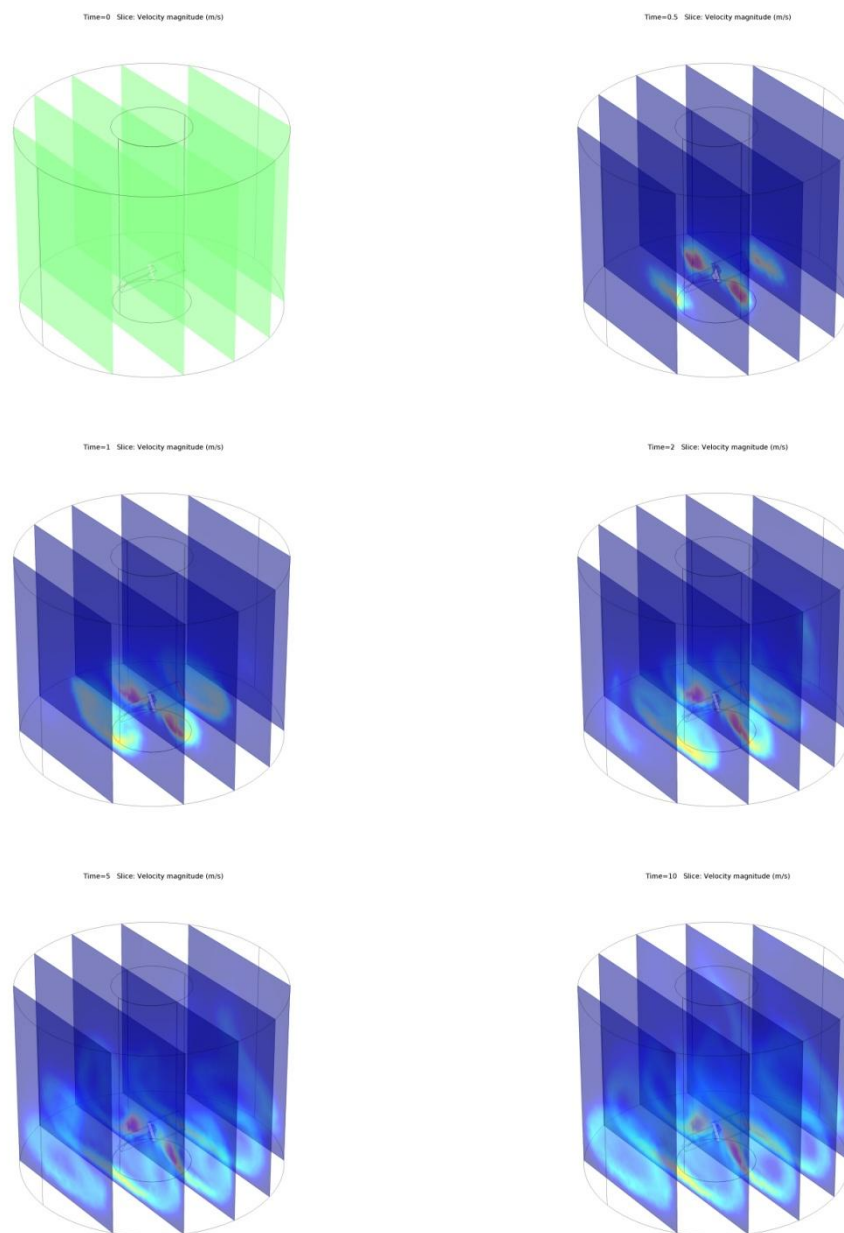


Figura 7.7: campo di velocità con agitatore meccanico a differenti tempi

Da questi risultati si è potuto estrapolare il moto delle particelle determinato dal campo di velocità e dalla forza di gravità, come mostrato nella figura 7.8.

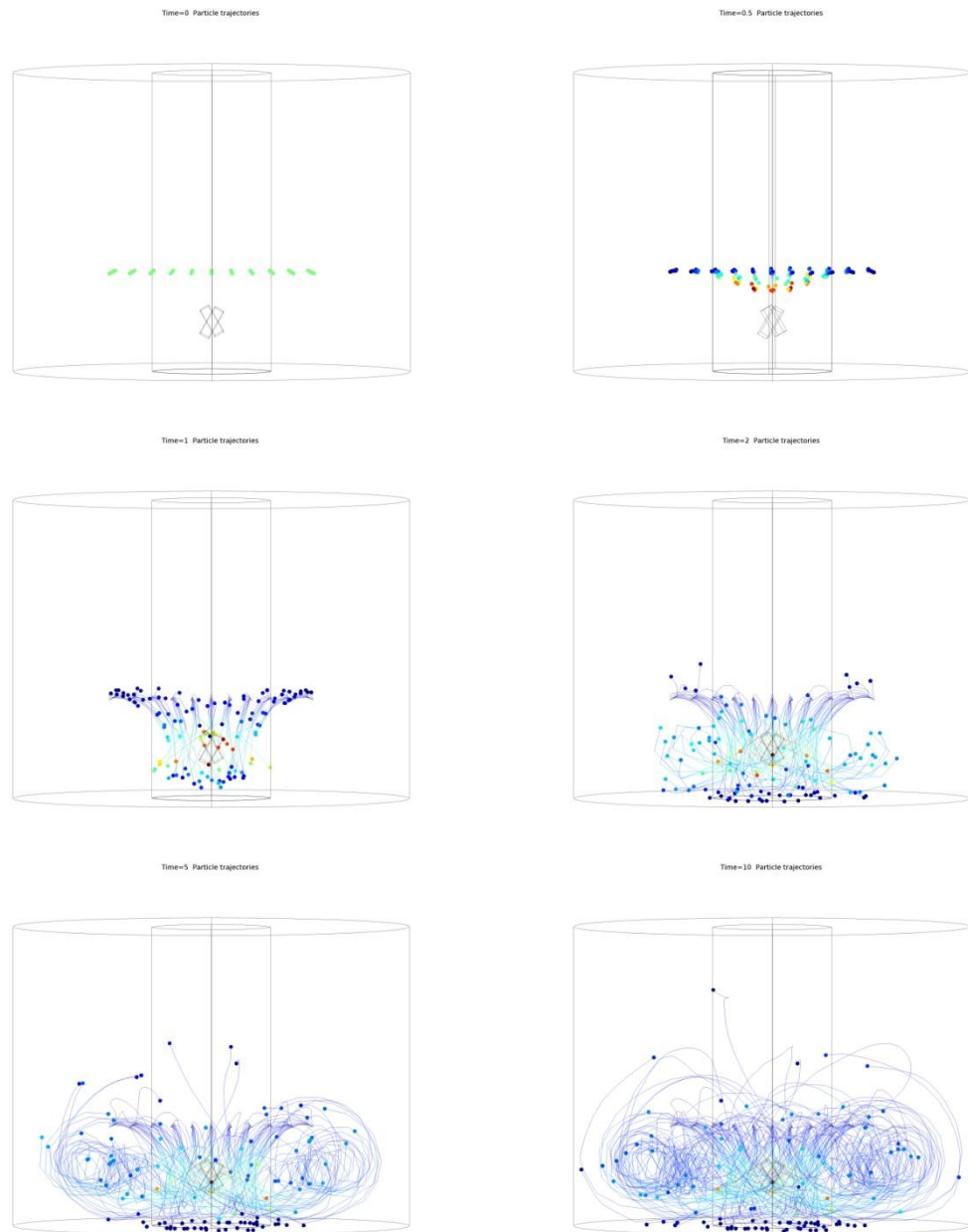


Figura 7.8: traiettoria di particelle di tartrato di potassio a differenti tempi

Risulta chiaro da quest'ultima figura che la maggior parte delle particelle restano sospese all'interno del fluido, e comunque nessuna di queste va a collidere con le superfici laterali, sedi del raffreddamento, evitando di depositarsi.

7.3 Icepack

Dalle esperienze sperimentali effettuate risulta che le caratteristiche sensoriali e la shelf life dei mirtilli inseriti nell'Icepack appena dopo la raccolta non sono differenti rispetto a quelli che non sono stati inseriti (campione test). Questo perché il raffreddamento provocato dalla lastra di ghiaccio in fusione non è stato abbastanza efficace. Jackson et al. (1999) affermano che le differenze sulla qualità del prodotto, trattato con un precooling o meno, vengono evidenziate se si riesce a portare la temperatura dei mirtilli a 5 °C entro due ore dalla raccolta. Per questo si è proceduto ad ottimizzare il modello per raggiungere questo obiettivo. Le prime considerazioni sono state fatte sugli spessori sia del contenitore che della lastra di ghiaccio. Lo spessore delle pareti della scatola di polistirolo poco influisce sulla temperatura che si riesce a raggiungere internamente, dovuta al fatto che le differenze di temperatura non sono così elevate, mentre la massa di ghiaccio influisce solo sulla durata del raffreddamento, non influenzandone la rapidità (figura 7.9).

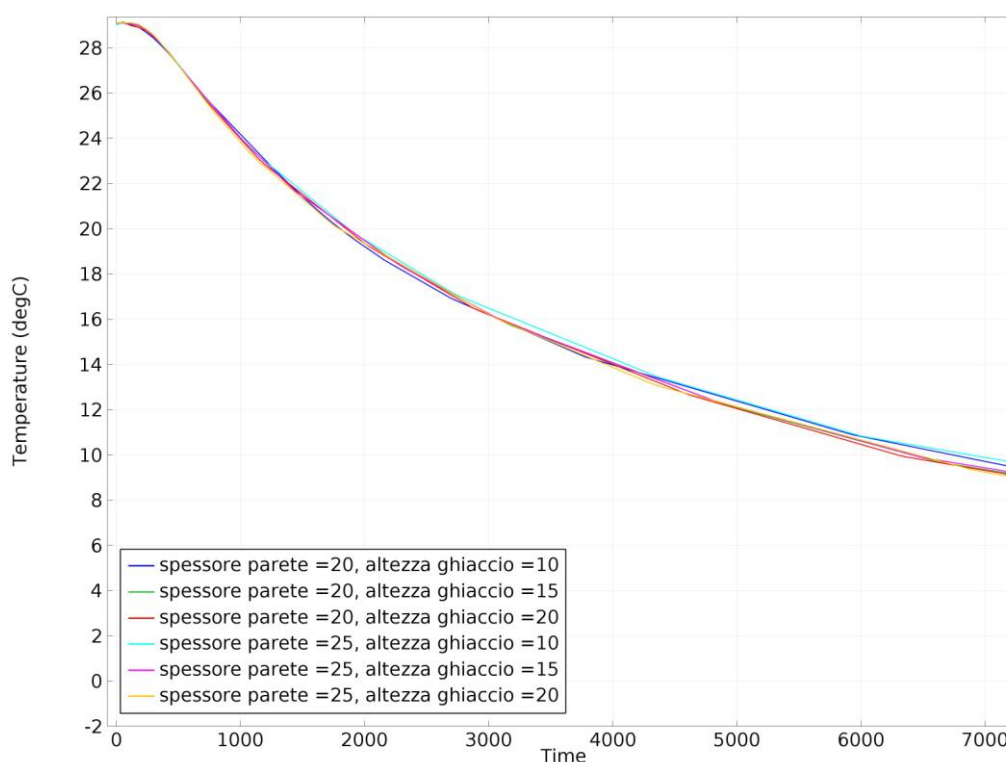


Figura 7.9: temperatura dei mirtilli a diverse dimensioni della scatola e della lastra di ghiaccio

Si è quindi provveduto a ipotizzare l'utilizzo di un liquido differente dall'acqua per diminuire la temperatura di fusione e portarla quindi a -4 °C e/o diminuire la quantità di materiale da dover raffreddare. Osservando il

grafico in figura 7.10 si nota che la migliore alternativa è di utilizzare una temperatura di fusione di -4°C e un peso del materiale da refrigerare pari a 1.5 kg, che porta a una temperatura di 5°C in circa 1 ora e 30 minuti. Il liquido che dovrà essere congelato però non è acqua, quindi per il suo utilizzo si va incontro a problemi differenti dall'ambito termico. La miglior soluzione applicabile è quindi quella di utilizzare l'acqua come fluido refrigerante e diminuire del 25% la quantità di materiale da raffreddare, quindi portarlo da 2 kg a 1.5 kg, che permette il raffreddamento dei mirtilli a 5°C in 2 ore

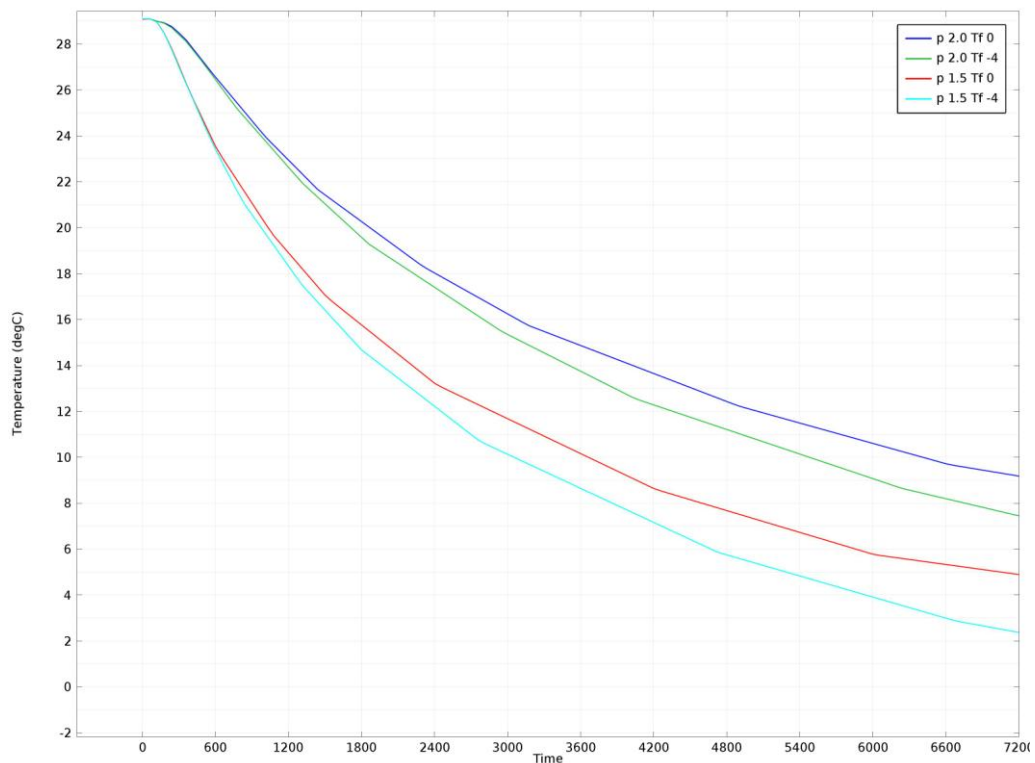


Figura 7.10: temperatura dei mirtilli con differenti temperature di fusione del materiale in cambiamento di stato e con diverse quantità di mirtilli

Pubblicazioni

Modeling of heat and moisture transfer phenomena during dry biscuits baking by using finite element method

Post harvest cold chain optimization of little fruits

MODELLING OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER PHENOMENA DURING DRY BISCUIT BAKING BY USING FINITE ELEMENT METHOD

E. FERRARI ^a, S. MARAI ^{a*}, R. GUIDETTI ^a, L. PIAZZA ^b

^a DIA-Department of Agricultural Engineering, via Celoria, 2 20133 – University of Milan - Italy

^b DISTAM-Department of Food Science and Microbiology – University of Milan - Italy

ABSTRACT

This paper validates a simultaneous heat and mass transfer model proposed to describe the discontinuous biscuit baking process. The mathematical model includes the moving evaporation front and the development of the crust observed during the baking process. The problem is solved over a two-dimensional geometry using the finite element method. Thermo-physical properties were computed by means of continuous functions. Variations in temperature and water content during baking were predicted with high to discrete accuracy using this model.

Nomenclature

c	Water (liquid or vapour) content ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3$)	Subscript	
Cp	Specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	a	Water
D	Water (liquid or vapour) diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	c	Carbohydrates
h	Convective heat transfer coefficient ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	e	Evaporation
k	Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	ex	Experimental
kg	Surface water transfer coefficient (m s^{-1})	p	
L	Thickness (m)	fc	Crust formation
lda	Latent heat of evaporation (J kg^{-1})	fsc	Under-crust formation
R	Radius (m)	init	Initial
T	Temperature (K)	l	Fat
T	Time (s)	mo	Modeled
W	Moisture (kg kg^{-1})	d	
		p	Protein
		s	Surface
		w	Wall
		∞	Ambient
Greek symbols			
β_1	Bessel root of 1 st order		
ε	Emissivity		
ρ	Density (kg m^{-3})		
σ	Stefan-Boltzmann constant ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)		

INTRODUCTION

Baking dry biscuits is a complex process (Fahloul et al. 1994; Mundt and Wedzicha 2007; Sablani et al. 1998) since dough goes through different physical, chemical and biochemical transformations before it can be called a baked product, a stiff structure, eventually fragile, with a high resistance to shearing stress and with particular sensorial features.

During baking, the thermal energy is transferred to the product's surface by radiation from the oven walls and by convection from the hot air inside the baking chamber (Baik et al. 1999;

Shibukawa et al. 1989). Finally, a conductive heat transfer occurs through internal flux within the product from its surface to the center (Mirade et al. 2004).

The main hurdle in describing baking, from both a phenomenological and a mathematical point of view, is associated with the non-uniform heating regime and, accordingly, with the non-uniform physical, chemical and structural changes that conversely and significantly influence the thermo-physical properties of the system (Ozilgen and Heil 1994).

The most relevant transformation taking place during baking is the transfer of water from dough to the baking chamber due to evaporation. Dehydration occurs along with a volume increase that is due to the expansion of the existing gas from leavening and the pressure of the steam that is produced as a consequence of the thermal intake. Thermo-setting of the gluten network counters the gas expansion, depending on the rheological properties of the dough, the extent of the starch gelatinization, and fat melting. Finally, crust formation slows down the mass transfer and gives the expected surface browning (Ameur et al. 2007; Chevalier et al. 2002; Mirade et al. 2004; Ozilgen and Heil 1994; Purlis and Salvadori, 2009; Sakin et al. 2007(a); Sakin et al. 2007(b); Savoye et al. 1992; Thorvaldsson and Skjoldebrand 1998; Thorvaldsson and Jenestad 1999; Zhou and Therdthai, 2007).

Baking modeling is still an open subject of research, with studies ranging from rheology to heat and mass transfer concepts of food engineering.

Keiser (1974) first published a mathematical model of baking in which oven thermal treatment was regarded as an air drying operation that was characterized by a constant diffusion followed by a transient step with diffusion changing depending on moisture content and the evaporation forefront. Moreover, the surface color development was described as a function of the surface temperature, the moisture content, and the initial color. Oven temperature and humidity variables were figured in the model. By considering appropriate thermo-physical properties, the model outcomes were the temperature and moisture content in the product.

Christenson et al. (1989) stressed the importance of accurate measurements of the thermo-physical properties of the product to be baked in order to gain knowledge to be applied to new products and to simulate the behavior of the products under precise process conditions.

Savoye et al. (1992) described baking in terms of simultaneous heat and mass transfer, but they considered temperature and moisture to be uniform inside the biscuits and dough properties to be constant since there were no useful studies on the change that occurred in a product's parameters during a real baking operation.

Faholoul et al. (1994) suggested a mono-dimensional, simultaneous heat and mass transfer model and were the first to observe that the inside temperature of the product increased to over 100°C while previous studies suggested the temperature asymptotically rose up to 100°C. Since their target was the optimization of the oven, they considered the product's properties during baking to be constant and uniform.

Ozilgen and Heil (1994) developed a two-dimensional model based on the hypotheses that the product's surface immediately reaches the temperature of water boiling and that this temperature is kept constant until surface evaporation is limited by an insufficient entry of water from the internal mass diffusion flux. This causes the temperature to increase further.

Broyart and Trystram (2002) presented a deterministic model to predict the principal phenomena of heat and mass transfer between a thin baked product and its environment during baking. They considered temperature and moisture to be uniform in the cross section of the oven. In a further study, Broyart and Trystram (2003) added new variables to their previous model, dealing with thickness and surface color.

Sensory quality attributes of baked products were also considered by Sosa-Morales et al. (2004). They modeled freezing preservation and microwave and traditional oven baking of pre-baked biscuits. An additional outcome was a description of the surface color using the tristimulus method. During the precooking step, the color did not change, and the final color is different depending on the method used to complete the baking (microwave or traditional).

Mundt and Wedzicha (2007) described the formation of color measured by the reflectance of the baked product, which occurs due to Maillard's reaction, as the most important quality parameter for consumer acceptability.

Biscuits formulations reflecting different structures were the subject of recent studies. Most of these focused on the formation of bubbles and on the difference between crust and crumb.

Lostie et al. (2004) modeled the difference between the viscoelastic compressible crumb and the porous structure of crust, and they included the material properties in the governing equation with the numerical estimation, fitting the simulated curves to experimental data obtained during the baking.

Jefferson et al. (2006) focused on crust formation. They hypothesized that the formation of crust is due to a collapse of the bubbles, stating that the crust region ends where the density in the inner part of the mass is equal to the initial density of the dough.

Purlis and Salvadori (2009) used a simultaneous heat and mass transfer model, based on a moving evaporation front, to focus on an evaporation-condensation mechanism and on the crust thickness development during the baking. Thermo-physical properties were estimated using a sensitivity analysis and a parameter estimation procedure.

In a recently published work (Mondal and Datta, 2010) the finite element method (FEM) modeling approach was applied in studying a special type of crustless bread that was produced by spraying water on its surface. This peculiarity facilitates the better understanding of the baking process, but, obviously, with disregarding the crust formation and its interaction with the crumb considerable approximation of real heat and mass transfer boundary conditions are put forward. Furthermore in the cited work some thermo-physical properties were estimated as a function of time and not related to changing material composition, so the model is linked to these fixed boundary condition.

In recent years, computer simulation assumed a predominant role in modeling the baking process, and nowadays it is one of the most useful tools to help one understand processes and to predict phenomena. Simulation can be defined as a process that describes real phenomena without carrying out experiments, and its aim is to understand, control, and predict a certain real process (Purlis and Salvadori 2009). With the improvement of processor speeds and the RAM availability, it is possible to correlate thermo and physical properties with baking time, product temperature and moisture content, so the accuracy of the model is improved (Norton and Sun 2007). Not so long ago, it was necessary to simplify parameter equations to make time simulations

compatible with their use (Baik et al. 2001; Broyart and Trystram 2002). The expanded mathematical capability enables new edges in the study of the baking unit operation and in modeling the movement of air inside the oven.

This paper deals with the first step used in the finite element method (FEM) modeling of the baking process used to produce dry biscuits. It will be used to improve the current model with the aim of overthrowing the simplified description of the complex phenomena taking place during baking.

MATERIALS AND METHODS

2.1 Biscuit dough

We used a standard recipe for short pastry, using the following ingredients: 500 g wheat flour “00” (Molino F.lli Chivazza S.p.A., Casalgrasso -CN-, Italy), 250 g butter (CARREFOUR, Bolzano Vicentino -VI-, Italy), 125 g sugar (Sudzucker, Mannheim, Germany), 2 eggs weighing about 65 g. Ingredients were mixed in the multi-function Krups 3 MIX 7007 ProMetal food processor (Krups, Offenbach am Main, Germany) equipped with spiral arms for 3 minutes at 600 rpm and 16 revolutions per minute followed by another 7 minutes at 900 rpm and 22 revolutions per minute. The dough was allowed to rest at 4°C for 15 hours before it was molded and baked.

Samples were formed in a cylindrical mold (stainless steel AISI 304) 3 cm high and 6 cm diameter, riddled with holes, and stored at room temperature before the thermal treatment.

2.2 Baking tests

Dough samples in the mold were baked in an electrical natural convection static oven (M20-VN INSTRUMENTS –Bernareggio- Italy), 0.3 m high, 0.3 m wide and 0.24 m long. Baking was carried out at 180°C for various time intervals: 30, 45, 60 and 75 minutes. The sample was placed in the center of the baking chamber on a metal net to achieve a homogenous distribution of heat and mass fluxes.

2.3 Temperature measurement

Oven air and biscuit temperatures were monitored using T-type thermocouples (TC) connected to a datalogger (HP BENCHLINK DATA LOGGER 34970A) and connected to a PC. The temperature acquisition frequency was 0.1 Hz. Thermocouples were placed at three different heights along the axial axis (5 mm from the top, 5 mm from the bottom and in the center of the sample), figure 1. A metal frame (stainless steel AISI 304), attached outside the mold was used to determine the insertion points of thermocouples inside the dough and to minimize the shift of thermocouples during baking.

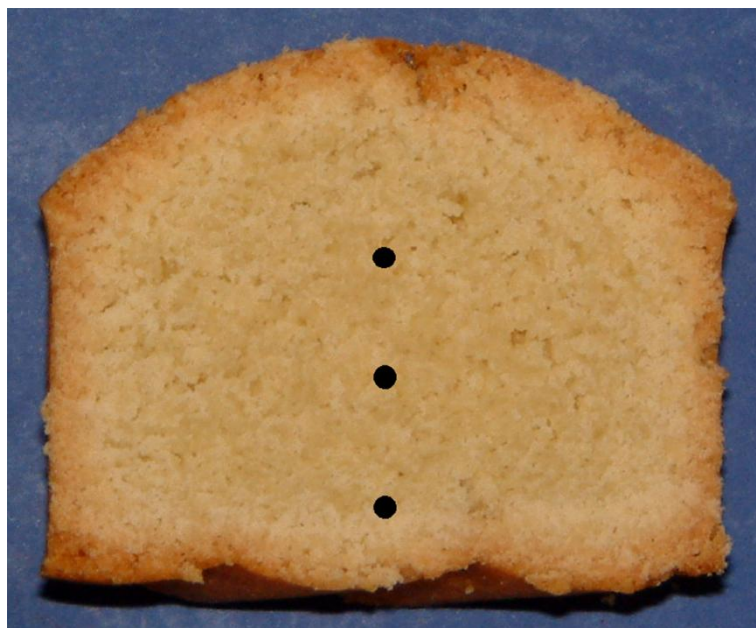


FIGURE 1. POSITIONING OF TEMPERATURE PROBE: 5 MM FROM BOTTOM, 5 MM FROM TOP AND CENTER OF SAMPLE

2.4 Moisture content

Moisture content was measured in five different regions of the baked product, portioning the sample in 9 vertical sector supposed to be at constant moisture contents, exploiting the symmetry and therefore considering that the corresponding sector had the same moisture, figure 2. An infrared moisture analyzer (Sartorius MA100, Goettingen, Germany), was used to measure the moisture content (analysis parameters: $T = 130^{\circ}\text{C}$, automatic stop when the gradient is less than 0.1% in 300 seconds). Data are presented as mean values of 3 replicates for each baking time.

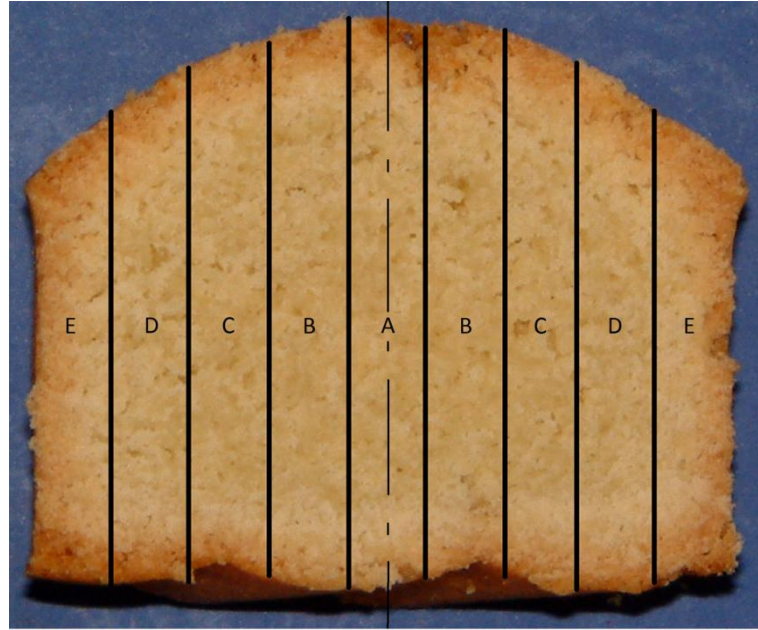


FIGURE 2. BISCUIT DIVISION FOR MOISTURE MEASUREMENT

2.5 Crust Thickness

Crust thickness was measured after different baking times using the TAXTplus texture analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, U.K.) equipped with a cylindrical geometry of 5 mm diameter at a compression rate of 50 mm/min and an image analysis tool. Images were acquired using a video camera (Fujifilm, FinePix6800Zoom, Tokyo, Japan), and then the digitalized images were analyzed with dedicated software (IMAGE PRO 6.3, MEDIA CYBERNETICS, Bethesda, USA).

1. MATHEMATICAL MODEL

In recent years, computational simulation has developed greatly, thanks to more powerful processors. This offers researchers a recognized advantage by allowed them the possibility of combining different aspects of a problem in a single solution. The changes in properties value due to process variables (temperature and moisture) are computed in each point of the domain by the software, taking into account the characteristics of that point at that time. The explanation of the thermo-physical properties of the materials and their behavior in unsteady conditions and a geometry definition, as precise as possible, which will lead to the most accurate results.

3.1 Governing equations and boundary conditions

By considering the simultaneous heat and mass transfer between the biscuit and the baking chamber that occurring during baking, the governing equations and the corresponding boundary

conditions will refer to a heat balance equation (1) and a mass balance equation (2), considering the biscuit an isotropic cylindrical two-dimensional axial-symmetric square object. Equation (1) shows the heat conduction equation in cylindrical coordinates where heat transfer in radial (r) and longitudinal (z) directions are assumed to be significant, while the heat transfer in angular direction (θ) is neglected. Equation (2) shows the diffusion equation in cylindrical coordinates where mass transfer in radial (r) and longitudinal (z) directions are assumed to be significant, while the mass transfer in angular direction (θ) is neglected. The mold, riddled with holes and with little thickness, does not limit heat and mass transfer, as well as the net where the dough was placed inside the baking chamber, so all boundaries were considered as free (except for axial-symmetric boundary):

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) \right) \quad (2)$$

boundary conditions:

$$-k \nabla T = h(T_{\infty} - T_s) + \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_s^4) - kg \cdot l da \cdot (c_s - c_{\infty}) \quad (3)$$

$$-D \nabla c = kg \cdot (c_{\infty} - c_s) \quad (4)$$

biscuit initial conditions:

$$T(0 < r < 0.03 \cap 0 < z < 0.03)_{t=0} = 294,75 \text{ K} \quad (5)$$

$$c(0 < r < 0.03 \cap 0 < z < 0.03)_{t=0} = 233.3 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

baking chamber initial conditions:

$$T[(r \cup z / (0 < r < 0.03 \cap 0 < z < 0.03))]_{t=0} = 453,15 \text{ K} \quad (7)$$

$$c[(r \cup z / (0 < r < 0.03 \cap 0 < z < 0.03))]_{t=0} = 0.015 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

3.2 Thermo-physical properties

Thermo-physical properties must be valid and continuous over all of the temperature and moisture ranges and the model solution converges. In the points where the equations that describe the properties are not continuous ($T_e=381,15 \text{ K}$; $T_{fc}=383.15 \text{ K}$; $c_{fc}=32.4 \text{ kg/m}^3$; $c_{fsc}=64.8 \text{ kg/m}^3$) the smoothed Heaviside function was used.

The smoothed Heaviside function's value is equal to zero for an argument less than the non-continuous point minus the interval ($\Delta T^*=0.564 \text{ K}$ and $\Delta c^*=1 \text{ kg}_w/\text{m}^3$) and is equal to one for an argument greater than the non-continuous point plus the interval. Thus, this function has the value of 0 in the interval from $-\infty$ to $x-\Delta x$, the value 1 in the interval from $x+\Delta x$ to $+\infty$ and a fifth grade polynomial equation (called A) in the interval from $x-\Delta x$ to $x+\Delta x$. Smaller is this interval quicker is the change between the values 0 and 1. 'A' is not determinate, because its equation varies with the interval (Δx) chosen and with the value of the discontinuity point (x) (COMSOL AB, 2007). The non continuous points are due to quickly changes in material characteristic: $T_e=381,15 \text{ K}$ is the evaporation temperature of water, obtained experimentally, ($y_1(T)$); $T_{fc}=383.15 \text{ K}$ is the temperature where, with a simultaneously content of water under $c_{fsc}=64.8 \text{ kg/m}^3$, crumb became sub-crust and with content of water under $c_{fc}=32.4 \text{ kg/m}^3$ sub-crust became crust, ($y_2(T)$). Crust moisture is homogeneous and constant during the baking time (Vanin et al., 2009), so the content of water of the crust was carried out using the IR moisture analyzer, scratching the full thickness of the crust (calculated by the texture analyzer). From this analysis the value $c_{fc}=32.4 \text{ kg/m}^3 \pm 0.38 \text{ kg/m}^3$ was found, ($y_1(c)$). In the same way was found the value $c_{fsc}=64.8 \text{ kg/m}^3 \pm 3.5 \text{ kg/m}^3$ as the content of water of the sub-crust, ($y_2(c)$).

The choice of temperature interval ($\Delta T^*=0.564 \text{ K}$) was made so that the value of equation (12) has the maximum of 1. Content of water interval was taken, for simplicity and considering the values to which it is reported, as 1 kg/m^3 .

$$y_1(T) = \begin{cases} 0 & T < 381.15 - 0.564 \\ A & 381.15 - 0.564 < T < 381.15 + 0.564 \\ 1 & T > 381.15 + 0.564 \end{cases} \quad y_2(T) = \begin{cases} 0 & T < 383.15 - 0.564 \\ A & 383.15 - 0.564 < T < 383.15 + 0.564 \\ 1 & T > 383.15 + 0.564 \end{cases}$$

$$y_1(c) = \begin{cases} 0 & c < 32.4 - 1 \\ A & 32.4 - 1 < c < 32.4 + 1 \\ 1 & c > 32.4 + 1 \end{cases} \quad y_2(c) = \begin{cases} 0 & c < 64.8 - 1 \\ A & 64.8 - 1 < c < 64.8 + 1 \\ 1 & c > 64.8 + 1 \end{cases}$$

where A is the fifth grade polynomial function.

3.2.1 Thermal Conductivity

It is commonly assumed that thermal conductivity in foods depends on composition and temperature (Baik et al. 2001). Thermal conductivity was therefore checked over the course of the baking process by taking into account changes in dough moisture content.

The crust formation, happens when a simultaneous temperature above 381.15 K and a water concentration under 32.4 kg/m³, implies quick changes in thermal conductivity. Moreover, crust acts as a barrier to heat transfer (Vanin et al., 2009). So the value 0.06 W/m·K employed by Rask (1989) was used.

$$k(T, c) = \begin{cases} \frac{c}{\rho_{init}} \cdot k_a + (1 - \frac{c}{\rho_{init}}) \cdot (0.0802 \cdot k_p + 0.7593 \cdot k_c + 0.1605 \cdot k_l) & T < T_{fc} \cap c > c_{fc} \\ 0.06 & T > T_{fc} \cap c > c_{fc} \end{cases} \quad (9)$$

where k_a , k_p , k_c and k_l are respectively the thermal conductivity of water, protein, carbohydrates and fat, as function of temperature, as described by Biak et al. (2001).

3.2.2 Density

A biscuit's density was calculated depending on its composition and temperature (Baik et al. 2001):

$$\rho(T, c) = \frac{c}{\rho_{init}} \cdot \rho_a + (1 - \frac{c}{\rho_{init}}) \cdot (0.0802 \cdot \rho_p + 0.7593 \cdot \rho_c + 0.1605 \cdot \rho_l) \quad (10)$$

where ρ_{init} , is the dough density, and ρ_a , ρ_p , ρ_c , ρ_l , are respectively the density of water, protein, carbohydrates and fat, as function of temperature, as described by Biak et al. (2001).

3.2.3 Specific Heat

The specific heat is dependent on temperature and composition and is also related to the water phase change occurring during baking (COMSOL, 2007).

$$Cp(T, c) = \begin{cases} \frac{c}{\rho_{init}} \cdot Cp_a + (1 - \frac{c}{\rho_{init}}) \cdot (0.0802 \cdot Cp_p + 0.7593 \cdot Cp_c + 0.1605 \cdot Cp_l) & T < T_e - \Delta T^* \\ H + (G \cdot lda) \cdot \left(\frac{c}{\rho_{init}} \right) + A \cdot \frac{lda}{T_e} \cdot \frac{c}{\rho_{init}} & T_e - \Delta T^* < T < T_e + \Delta T^* \\ H + \frac{lda}{T_e} \cdot \frac{c}{\rho_{init}} & T > T_e + \Delta T^* \end{cases} \quad (11)$$

where C_{p_a} , C_{p_p} , C_{p_c} , C_{p_f} are respectively the specific heat of water, protein, carbohydrates, and fat, as function of temperature, as described by Biak et al. (2001), H is the equation

$$\frac{c}{\rho_{init}} \cdot C_{p_a} + \left(1 - \frac{c}{\rho_{init}}\right) \cdot (0.0802 \cdot C_{p_p} + 0.7593 \cdot C_{p_c} + 0.1605 \cdot C_{p_f}),$$

A is a fifth grade polynomial function (see 3.2) and G is equation (12), with values between 0 and 1, which contemplate the latent heat of vaporization only where it must be actually used ($G=1$ when $T=T_e=381.15$ K and $G \approx 0$ when $T < 379.65$ K and $T > 379.65$ K).

$$G = \frac{\exp\left(-\frac{(T - T_e)^2}{\Delta T^{*2}}\right)}{\Delta T^* \cdot \sqrt{\pi}} \quad (12)$$

3.2.4 Mass Diffusivity

The mass diffusivity of the crumb was calculated following the lead of Senadeera et al. (2003). For a finite cylindrical geometry is:

$$MR = \frac{W - W_\infty}{W_{init} - W_\infty} = \frac{32}{\beta_1^2 \cdot \pi^2} \cdot e^{-\left(\frac{\beta_1^2 \cdot D \cdot L^2 \cdot t + \pi^2 \cdot D \cdot r^2 \cdot t}{r^2 L^2}\right)} \quad (13)$$

Mass diffusivity resulting from equation (13) is expressed by:

$$D = \frac{r^2 \cdot L^2}{(\beta_1^2 \cdot L^2 + \pi^2 \cdot r^2) \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{\beta_1^2 \cdot \pi^2}{32} \cdot MR\right) \quad (14)$$

where MR is derived from experimental data. The mass diffusivity of the crumb results $1.305 \cdot 10^{-8}$ m²/s.

Crust formation acts as a barrier to mass transfer according to Purlis and Salvadori (2009), Wählby and Skjöldebrand (2002), Vanin et al. (2009) and Zanoni et al. (1994). Mass diffusivity in the crust region was obtained from references and is $1 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

Between the crumb and the crust there is a transition zone (sub-crust) where the mass diffusivity is assumed to be the arithmetical mean between crust and crumb mass diffusivities.

$$D(T, W) = \begin{cases} 1.305 \cdot 10^{-8} & T < T_{fc} \cap c > c_{fc} & \text{crumb} \\ 7.025 \cdot 10^{-9} & T > T_{fc} \cap c_{fc} < c < c_{fsc} & \text{sub-crust} \\ 1 \cdot 10^{-9} & T > T_{fc} \cap c < c_{fc} & \text{crust} \end{cases} \quad (15)$$

3.2.5 Surface coefficients

Surface transfer coefficients of the biscuit were calculated during the simulation by the software solving Navier-Stokes and diffusion equations.

Convective heat transfer coefficient varies with baking time and position on the upper surface from 5.0 to 14.7 W/m²K, on the side surface from 7.0 to 21.2 W/m²K and on bottom surface from 1.8 to 11.2 W/m²K.

Surface mass transfer coefficient varies with baking time and location on the upper surface from 4.5·10⁻⁵ to 3.4·10⁻³ m/s, on the side surface from 1.2·10⁻⁵ to 3.2·10⁻³ m/s and on bottom surface from 2.5·10⁻⁵ to 3.5·10⁻³ m/s.

The calculated coefficients have comparable values with the normal range of values used for natural convection.

Emissivity of the biscuit surface changes with color and structure, so we consider a linear dependence from 0.5 (dough) to 0.9 (cooked biscuit) for the upper surface, while a constant value of 0.35 on side and bottom surface (metal mold and metal net)

3.3 Geometry

The modeling procedure used in this study considers the biscuit (30 mm height and 60 mm diameter) to be a two-dimensional axial-symmetric object (30 mm square) having a regular shape. The volume changes during the baking process were not taken into account. The object is located in a baking chamber of 300 mm high and 150 mm wide (figure 3).

3.4 Numerical solution

A FEM was used to solve the thermo fluid dynamic problem. The numerical procedure was implemented in COMSOL Multiphysics (version 3. 5a), and its module ‘Heat Transfer’, with a time-dependent (transient) analysis, that included automatic time stepping. COMSOL Multiphysics automatically detects nonlinearity of partial differential equations, with a analysis of the variables contributing residual Jacobian matrix and constrain Jacobian matrix. If both the two matrices are complete and do not depend on solution, linear solver was used, otherwise nonlinear solver

(COMSOL AB, 2007). A direct (PARDISO) linear system solver was selected and non linearity was solved by an affine invariant form of the damped Newton method.

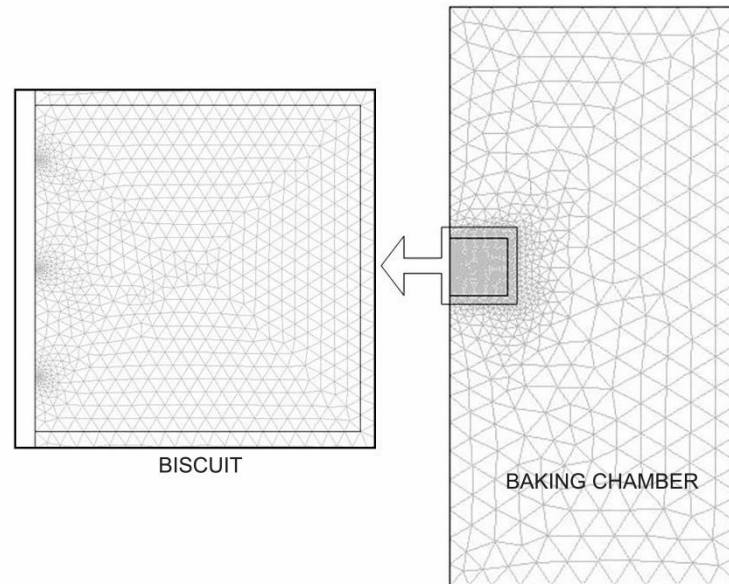


FIGURE 3. MESH OBTAINED WITH MAXIMUM ELEMENT SIZE 1.5MM IN THE BISCUIT SUBDOMAIN AND 0.1MM ON THE 3 POINTS WHERE THERE ARE THE EXPERIMENTAL TEMPERATURE PROBE

The space discretization (mesh) consisted of 2825 triangles that generate 17628 degrees of freedom with a greater density in the regions of interest: the boundary elements of the biscuit and the probe points inside it. They have 10 times greater refinement than the other geometry elements. The biscuit geometry (square 30 mm) was divided into 1548 elements, and the baking chamber (300x150 mm) was divided into 1277 elements (figure 3).

The overall baking simulation time was set at 75 minutes (4500 s), with a time step of 10 seconds. The solution time was about 9 min, using a PC with Intel® Core™2 duo processor T6570 @ 2.10GHz and 4GB RAM.

In order to verify the effect of the mesh size on the simulation solution, the relative error between the results obtained from two simulations at different mesh size is computed:

$$\% \text{ change} = \frac{|value_{coarse} - value_{fine-mesh}|}{value_{fine-mesh}} \cdot 100 \quad (16)$$

The outputs of the model are temperature and water content inside the biscuit. The temperature and water content differences at 4500 seconds of baking between the geometrical centre of the biscuit and a fixed point of the chamber space are computed. Three mesh sizes are considered, that generate 548, 2825 and 8340 elements.

The first pair of meshes gives the following results:

	Course (548 elements)	Fine (2825 elements)	% change
ΔT (K)	92.65	93.28	0.68
Δc (kg/m ³)	161.52	158.10	2.16

The last pair:

	Course (2825 elements)	Fine (8340 elements)	% change
ΔT (K)	93.28	93.31	0.03
Δc (kg/m ³)	158.10	158.05	0.03

No significant difference in the last pair lead us to say that for a mesh of 2825 elements the grid independence is satisfied.

2. RESULT AND DISCUSSION

The three-dimensional distributions of temperature and moisture in the biscuit when the baking was complete (75 minutes) are shown in Figures 4a and 4b after a 360° rotation of the initial square of the geometry around the vertical axis of symmetry. Colors represent temperature (from blue, cold, to red, hot) and moisture (from blue, dry, to red, humid).

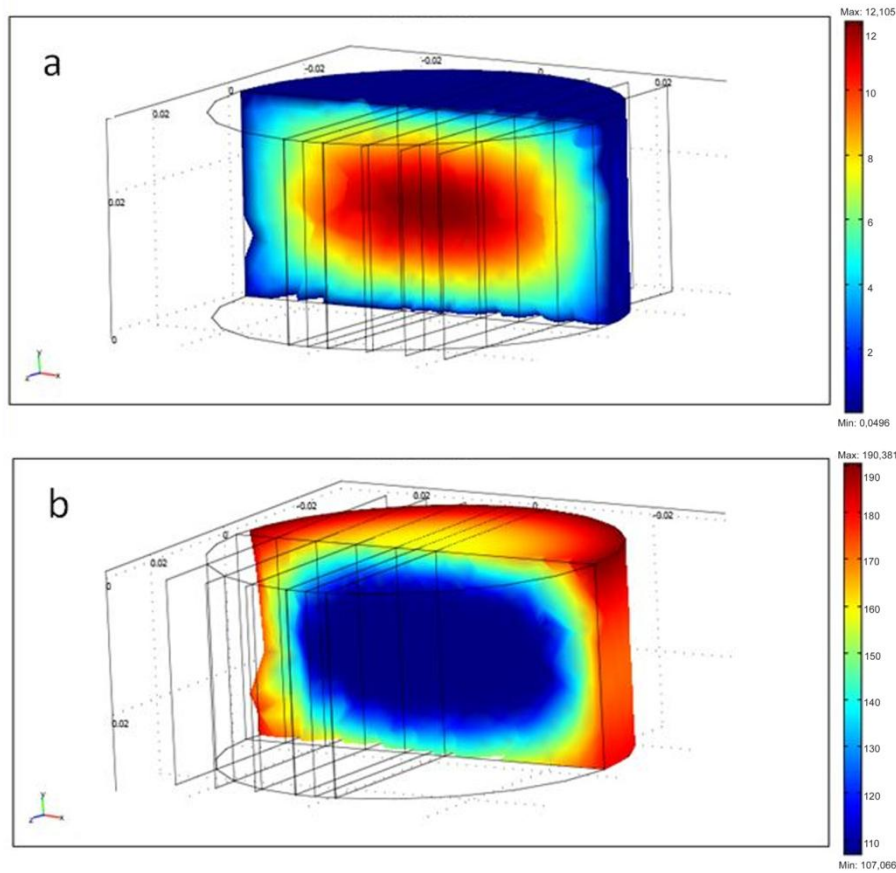


FIGURE 4. MOISTURE (A) (% WET BASIS) AND TEMPERATURE (B) (°C) DISTRIBUTION AT 4500 S SIMULATION

The mathematical model adequately shows the difference between the two main regions of the biscuit: crumb and crust. The inner part, the crumb, is blue in Figure 4b: the temperature does not exceed 108°C, and the moisture content is high. The outer part, the crust, is red in Figure 4b: here the temperature increases to over 108°C, coming close to the oven temperature and the water content decreases quickly. The water vaporization temperature is called an “evaporation front,” and in this case, it was at 108°C (Purlis and Salvadori, 2009).

The axial temperature profile obtained from the model is shown in Figure 5.

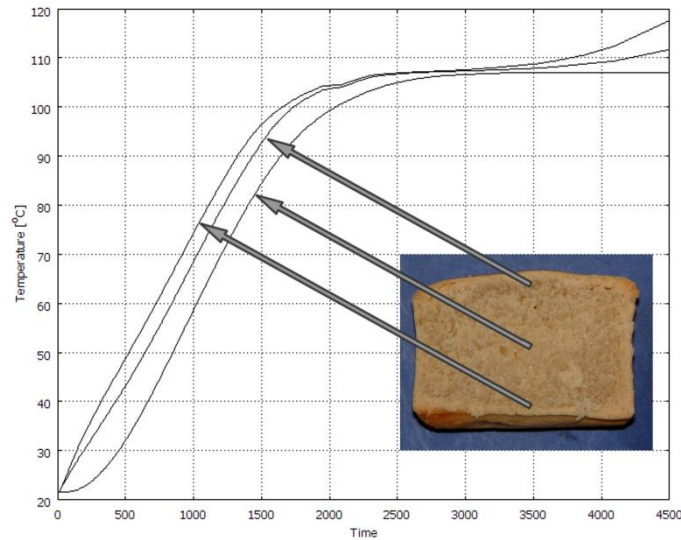


FIGURE 5. MODEL DEVELOPMENT OF TEMPERATURE. LOCATION: 0.5 CM FROM TOP SURFACE, 1.5 CM (CENTER), 0.5 CM FROM BOTTOM SURFACE

After a dramatic increase in temperature of both the crust and non crust regions, at around 2,000 seconds of baking, a plateau temperature is clear, corresponding to the evaporation front temperature (108°C). After 3,500 seconds, the non-crust region does not exceed this value, while at the crust region, the temperature further rises after water evaporation is accomplished. The kinetics of the threshold core temperature is graphically shown in Figure 6, where axial temperature profiles are presented for every 15 minutes of baking time during the entire 75 minutes of heating.

Our results corroborate previous observations on temperature dynamics within the biscuit. Once the threshold temperature equal to 108°C is reached, as baking time increases, the border temperature is detected moving progressively closer to the core of the biscuit, with a progressive withdrawal of the water evaporation front.

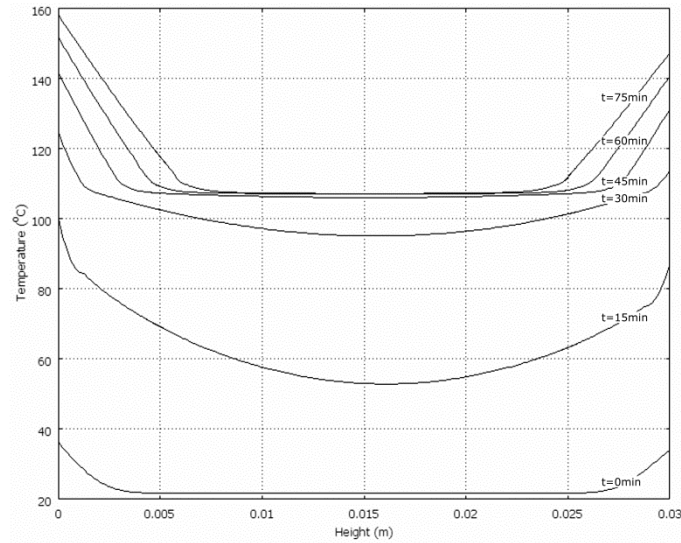


FIGURE 6. TEMPERATURE PROFILE (0-75 MINUTES, EVERY 15 MINUTES) DURING BAKING ALONG AXIAL AXIS

Finally, a two-dimensional simultaneous representation of both the thermal status and water evaporation profile of the biscuit as it changes during baking are given in Figure 7. The red curved lines represent the evaporation front. The overall temperature of the biscuit increases with baking time, and the evaporation front advances from the surface to the center as the core temperature is established at 108°C.

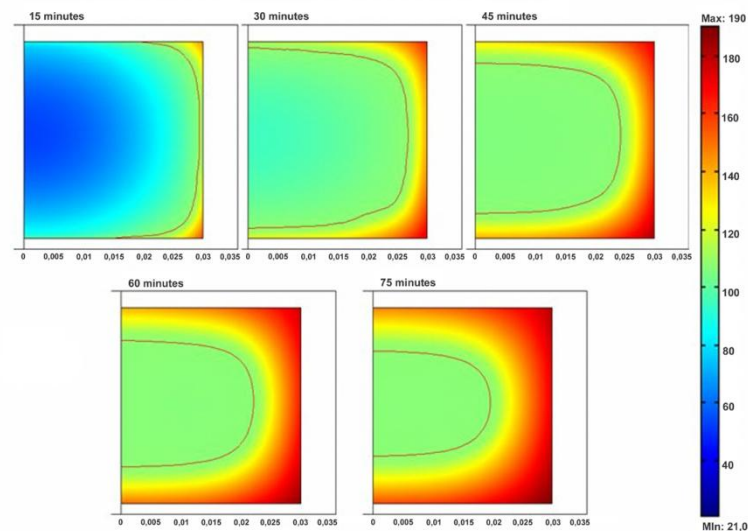


FIGURE 7. DISTRIBUTION OF TEMPERATURE (°C) DURING BAKING. THE CURVE LINES REPRESENTS THE EVAPORATION FRONT

Experimental data concerning monitoring of a biscuit's coldest point during baking (corresponding to the geometrical center) are compared in Figure 8 with results of the model.

A similar good match occurred when model curves and experimental data that were acquired from the other points using thermocouple monitoring of the temperature modifications were compared.

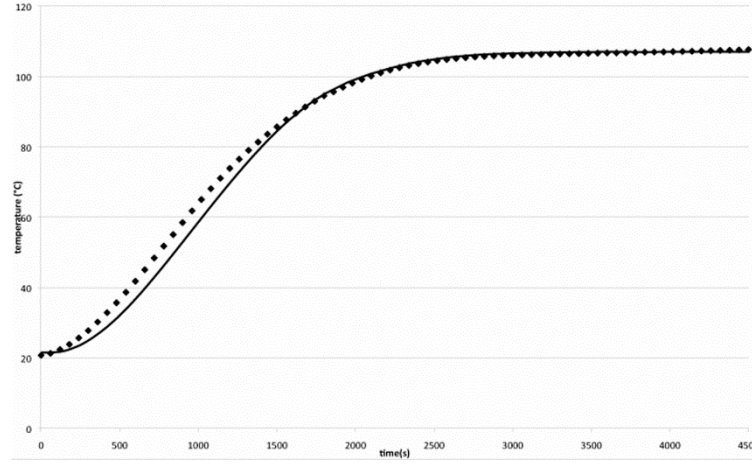


FIGURE 8. TEMPERATURE VARIATIONS AT THE CENTER OF BISCUIT DURING BAKING. SOLID LINE CORRESPONDS TO THE MODEL AND DOTS TO EXPERIMENTAL. ONLY EXPERIMENTAL VALUE EVERY MINUTE ARE SHOWN FOR SIMPLICITY

The quality of the simulation is given by the mean relative error, which is defined as:

$$e \text{ (\%)} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|T_{\text{exp}} - T_{\text{mod}}|}{T_{\text{exp}}} \right)_i \quad (17)$$

where n , the number of experimental observations (the temperature values which were acquired with a time step of 10 seconds within 75 minutes of baking) was 450. The calculated mean relative errors of the probes are: 0.46% at the central probe position, 0.75% in the upper one and 0.63% in the lower one. The highest error resulting from the upper probe was probably related to the experimental measurements: the exact positioning of the TC at 5 mm from the surface was, in fact, not so precise. During the baking the gas production modifies the initial shape with a vertical expansion of the volume of the biscuit, so the position of the probe, relative to the surface, changes during the baking process.

The mean relative error concerning the water content is defined as:

$$e \text{ (\%)} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|c_{\text{exp}} - c_{\text{mod}}|}{c_{\text{exp}}} \right)_i \quad (18)$$

where n is five. Experimental data were taken every 15 minutes during the entire 75-minute baking time. No measurement was taken before the first 30 minutes, when the sample was softened and there was no possibility to measure moisture. The mean relative error of the whole biscuit's humidity is 15.2%. A reason for the error in fitting might be assigned to the barrier effect towards evaporation that is caused by the mold holding dough during baking, leading to an overestimation of the moisture loss by the model.

Figure 9 shows the difference between real and modelled moisture in the crust and in the middle sector of the crumb (sector A and E of figure 2). It is easy to note that after 45 minutes of baking, the error of the external sector (E) is less than 1 percentage point, while in the central sector (A) is about 3 percentage points. Going ahead with baking the error on sector E remains of about 1 percentage point, while on sector A decreases until it reach 1 percentage point at the end of baking time (75 minutes).

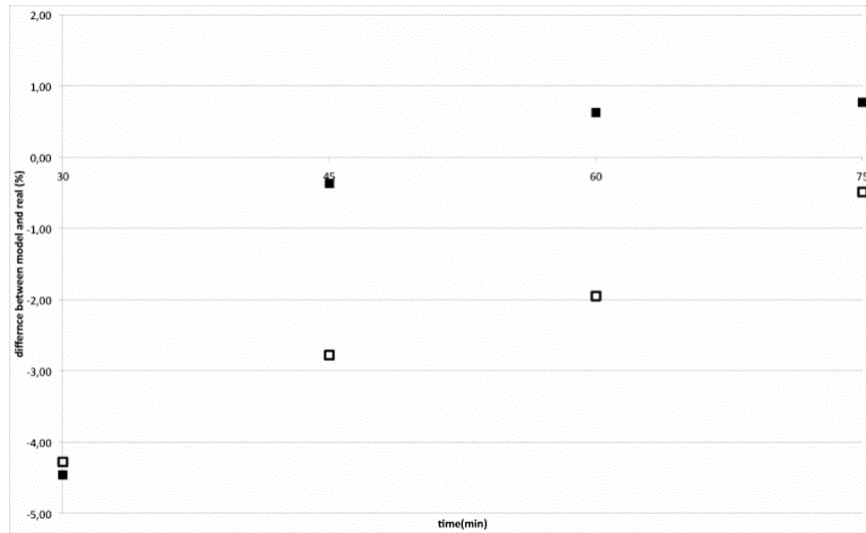


FIGURE 9. MOISTURE DIFFERENCE OF CENTRAL (EMPTY DOTS) AND EXTERNAL (FULL DOTS) SECTOR OF THE BISCUIT BETWEEN REAL AND MODELED (% WET BASIS)

Experimental data concerning monitoring of moisture of the biscuit are compared in Figure 10 with results of the model. In the first part of the graph (till 1800 s) there are not experimental points due to the softness of the dough, and also the first point suffers this effect, in fact the division of the biscuit in the different sector was not simple and the dispersion of the results

of the repetitions at 30 minutes is greater than the other baking time. When the baking time is higher the modeled curve follows the trend of the experimental point.

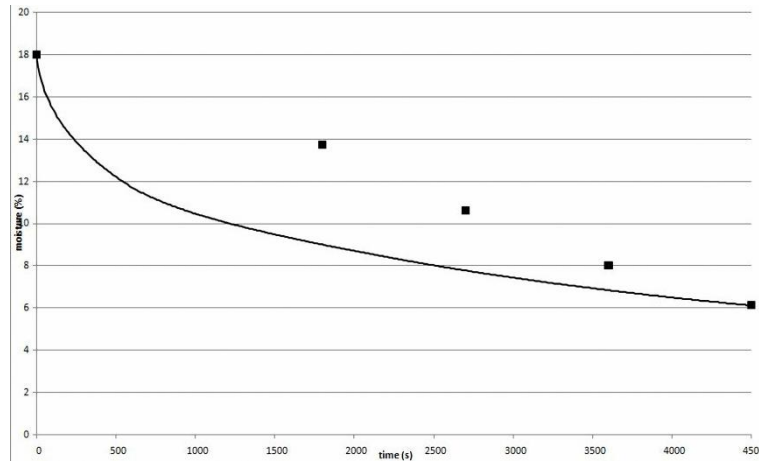


FIGURE 10. DEVELOPMENT OF BISCUIT MOISTURE DURING BAKING. SOLID LINE CORRISPONDS TO THE MODEL AND DOTS TO EXPERIMENTAL (%WET BASIS)

3. CONCLUSION

The finite element method (F.E.M.) for modeling discontinuous biscuit baking was presented in this paper. Using a continuous function for the thermo-physical properties of the biscuit, which changed during the baking process with temperature, content of water and crust formation, a model of heat transfer made it possible to obtain an accurate prediction of product temperature profiles. Conversely, the accuracy of model predictions was found to be limited for moisture profiles due to an underestimation of the mold's water evaporation-barrier significance.

The values of the thermo-physical properties used are comparable with values obtained by other authors on other analagous but different products. (Baik et al.,1999, Christenson et al. 1989, Chhanwal et al. 2010, Purlis and Salvadori, 2010). The mean relative errors (eq (17) and eq. (18)) are also comparable with that found in other studies, especially for the temperature profile (Purlis and Salvadori, 2009).

Improvements to the model is under way, which will deal with the inclusion of the biscuit's volume expansion kinetics and reological properties.

REFERENCES

- AMEUR, A. L., MATHIEU, O., LALANNE, V., TRYSTRAM, G., BIRLOUEZ-ARAGON, I., 2007. Comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperature. *Food chemistry* **101**, 1424-1433
- BAIK, O.D., GRABOWSKI, S., TRIGUI, M., MARCOTTE, M. CASTAIGNE, F., 1999. Heat transfer coefficient on cakes baked in a tunnel type industrial oven. *Journal of Food Science*, **64**, No. 4 688-694.
- BAIK, O.D., MARCOTTE, M.,SABLANI, S.S., CASTAIGNE, F. 2001. Thermal and physical properties of bakery products. *Critical reviews in Food science and nutrition* **41**, No. 5, 321-352
- BROYART, B., TRYSTRAM, G. 2002. Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits. *Journal of food engineering*, **51**, 47-57
- BROYART, B., TRYSTRAM, G. 2003 Modelling of heat and mass transfer phenomena and quality changes during continuous biscuit baking using both deductive and inductive (neural network) modelling principles. *Trans IChemE*, **81**, part C, December 2003, 316-326
- CHEVALLIER, S., DELLA VALLE, G., COLONNA, P., BROYART, B., TRYSTRAM, G., 2002. Structural and chemical modifications of short dough during baking. *Journal of cereal science* **35**, 1-10
- CHHANWAL, N., ANISHAPARVIN, A., INDRANI, D., RAGHAVARAO, K.S.M.S., ANANDHARAMAKRISHNAN, C. 2010. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electric heating oven for bread-baking process. *Journal of food engineering*, **100**, 452-460
- CHRISTENSON, M.E., TONG, C.H., LUND, D.B., 1989. Physical properties of baked products as a function of moisture and temperature. *Journal of food processing and preservation*, **13**, 201-217
- COMSOL AB, 2007. COMSOL Multiphysics –Heat transfer module – Model library. 217-230 Version: October 2007, COMSOL 3.4
- CRANK, J., 1975. The mathematic of diffusion (2nd edition). Oxford, UK: Oxford University Press
- FAHLOUL, D., TRYSTRAM, G., DUQUENOY, A. BARBOTTEAU, I. 1994. Modeling heat and mass transfer in band oven biscuit baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **27**, 119-124.
- JEFFERSON, D.R. LACEY, A.A., SADD, P.A. 2006. Understanding crust formation during baking. *Journal of food engineering*, **75**, 515-521.
- KAISER, V.A. 1974. Modeling and simulation of a multi-zone band oven. *Food Technology*, **28**, 50, 52-53
- LOSTIE, M., PECZALSKI, R., ANDRIEU, J., 2004. Lumped model for sponge cake baking during the “crust and crumb” period. *Journal of food engineering*, **65**, 281-286

- MIRADE, P. S., DAUDIN, J., D., DUCEPT, F., TRYSTRAM, G., CLEMENT, J., 2004. Characterization and CFD modelling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven. *Food research international*, **37**, 1031-1039
- MONDAL, A., DATTA, A.K., 2010. Two-dimensional CFD modeling and simulation of crustless bread baking process. *Journal of food engineering*, **99** 166-174.
- MUNDT, S., WEDZISCHA, L., B., 2007 A kinetic model for browning in the baking of biscuits: effects of water activity and temperature. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **40**, 1078-1082.
- NORTON, T., DA-WEN SUN, 2007. An overview of CFD application in the food industry. . In *Computation fluid dynamics in food processing*, (Da-Wen Sun eds.) pp 1-41, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton
- OZILGEN, M., HEIL, J.R. 1994 Mathematical modeling of transient heat and mass transport in a baking biscuit. *Journal of food processing and preservation* **18**, 133-148
- PURLIS, E., SALVADORI, V.O., 2009. Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling. *Journal of food engineering*. **91**, 428-433.
- PURLIS, E., SALVADORI, V.O., 2009. Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of food engineering*. **91**, 434-442.
- PURLIS, E., SALVADORI, V.O., 2009. Modelling the browning of bread during baking. *Food research international*, **42**, 865-870
- PURLIS, E., SALVADORI, V.O. 2010. A moving boundary problem in food material undergoing volume change – Simulation of bread baking. *Food research international*, **43**, 949-958
- RASK, C. 1989. Thermal properties of dough and bakery products: a review of published data. *Journal of food engineering*, **9**, 167-193
- SABLANI, S.S., MARCOTTE, M., BAIK, O.D., CASTAIGNE, F. 1998. Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. Review article. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **31**, 201-209
- SAKIN, M., KAYMAK-ERTEKIN, F., ILICALI, C., 2007(a). Modeling the moisture transfer during baking of white cake. *Journal of food engineering* **80**, 822-831
- SAKIN, M., KAYMAK-ERTEKIN, F., ILICALI, C. 2007 (b). Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking. *Journal of food engineering*, **83**, 463-474
- SAVOYE, I., TRYSTRAM, G., DUQUENOY, A., BRUNET, P., MARCHIN, F. 1992. Heat and mass transfer dynamic modelling of an indirect biscuit baking tunnel-oven. Part I: modelling principles. *Journal of food engineering*, **16**, 173-196
- SCHIBUKAWA, S., SUGIYAMA, K., YANO, T. 1989 Effects of heat transfer by radiation and convention on browning of cookies at baking. *Journal of Food Science*, **54**, No. 3, 621-624, 699.
- SENADEERA, W., BHANDARI, B. R., YOUNG, G., WIJESINGHE, B., 2003. Influence of shaped of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of food engineering* **58**, 277-283

- SOSA-MORALES, M.E., GUERRERO-CRUZ, G., GONZALES-LOO H., VELEZ-RUIZ, J.F. 2004. Modeling of heat and mass transfer during baking of biscuits. *Journal of food processing and preservation*, **28**, 417-432
- THORVALDSSON, K., JANESTAD, H., 1999. A model of simultaneous heat, water and vapour diffusion. *Journal of food engineering*, **40**, 167-172
- THORVALDSSON, K., SKJOLDEBRAND, C., 1998. Water diffusion in bread during baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **31**, 658-663
- VANIN, F.M., LUCAS, T., TRYSTRAM, G., 2009. Crust formation and its role during bread baking. *Trends in food science & technology*, **20**, 333-343.
- WAHLBY, U., SKJOLDEBRAND, C., 2002. Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of food engineering*, **53**, 177-184
- ZANONI, B., PIERUCCI, S., PERI, C., 1994. Study of the bread baking process – II Mathematical modeling. *Journal of food engineering*, **23**, 321-336
- ZHOU, W., THERDTHAI, N., 2007. Three dimensional CFD modelling of a continuous industrial baking process. In *Computation fluid dynamics in food processing*, (Da-Wen Sun eds.) pp 287-312, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton

POST HARVEST COLD CHAIN OPTIMIZATION OF LITTLE FRUITS

Marai S.^{*1}, Ferrari E.¹, Civelli R.¹

¹DiSAA, Università degli Studi di Milano

*Corresponding author: Via Celoria, 2, 20133, Milan, Italy - email: simone.marai@unimi.it

Abstract: This paper presents heat transfer 3-D models of a passive refrigeration system, called Icepack, used to improve the shelf life and the quality of the perishable fruits. Passive refrigerator system uses the changing phase of a material to keep temperature close to the melting temperature.

A multi-step COMSOL Multiphysics (ver 4.2a) study was performed:

- a 3-D heat transfer model on the empty box;
- a 3-D heat transfer model on the box containing a slab with apparent thermal properties obtained from the air and the fruit;
- a 3-D heat transfer model on the box filled with randomized diameter spheres, simulating the fruits, created with an original MatLab® script and imported in COMSOL Multiphysics® (ver. 3.5a).

The temperature profile inside the box and the melting time of the ice slab were studied.

Results of the models agree with experimental data. The modeled melting time of the empty Icepack gives an error of about 7%. Modeled temperature profile inside the box filled with fruits reflects real temperature profile.

Keywords: heat transfer, phase change, perishable fruits, passive refrigerator.

1. Introduction

Little fruits like blueberries, raspberries and blackberries need to be refrigerated as soon as possible after the harvest, to preserve the structural integrity and the nutritional and organoleptic properties. In fact, removing the field-heat, the respiration of these fruits decreases and so the shelf life of the product improves.

Due to the fragility of these fruits means that the harvest must be done manually and the filling phase must be as gentle as possible. All the chain of transport from the field to the consumer should not cause further damages to the product and so the plastic case of sell that contain the fruits is the same that was used during the harvest.

These plastic cases, containing about 250 g of fruits (inconvenient transport them one by one), are placed inside another bigger box, normally a wooden box, that contain 8 plastic little cases.

The refrigeration can start immediately after the harvesting with a passive refrigerator system, a special box, called Icepack.

The Icepack is a polystyrene box (external dimension: 42.5x33.5x12 cm) with a plastic hermetic bag filled of water (about 1.0 kg) placed on the bottom. Inside the Icepack is possible to place 8 little plastic cases as normal wood box. The wall thickness is 2 cm and the height of the plastic bag is about 1.8 cm. The bag is stored at -20 ° until the moment of the use. The heat flux from the outside is absorbed by the fusion of the ice keeping the temperature inside the Icepack almost constant, to 0°C, for a long period of time.

Another advantage of this transport system is in the stackability of the Icepack, that optimize the space occupied and the exchange surfaces with the external environment.

Experimental data were taken on blueberries taken in Ardenno (SO), Italy, in the Fojanini Foundation field.

2. Governing Equation

A mathematical model based on heat transfer in continuous media is used to model the cooling of blueberries. Temperature inside each material is considered uniform.

Respiration of fruits and inside convection was neglected because of the little internal height of the box (about 6 cm with the empty box) and presence of the cool slab of ice at the bottom of the Icepack. When the box is filled with plastic boxes with fruits, the space is occupied by these, so the free space for the air circulation, and then for the internal convection is further limited.

2.1 Energy conservation equation

Heat transfer occurs in three different form: conduction, convection (only external surface) and latent heat of fusion of water.

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$$

where ρ is the density, C_p is the specific heat and k is the thermal conductivity of the different material (see Table 1).

Icepack contains the plastic bag filled with water in the phase change, so a modified specific heat was used.

$$C_p = C_{p\ ice} + H(T)(C_{p\ w} - C_{p\ ice}) + G(T) \cdot l_{da}$$

where the subscript w is water, l_{da} is the latent heat of fusion, H is a smoothed step function of temperature from 0 to 1 and G is a Gaussian pulse centered in the fusion temperature. The pulse is necessary to simulate the latent heat of fusion (energy is absorbed while the temperature remains constant). The temperature range (defined by Gaussian pulse standard deviation) of the fusion is an approximation necessary because fusion at an exact temperature cannot be modeled numerically.

Also ρ and k of the water are modified density and thermal conductivity equations, that consider the two phases of water:

$$\rho = \rho_{ice} + H(T) \cdot (\rho_w - \rho_{ice})$$

$$k = k_{ice} + H(T) \cdot (k_w - k_{ice})$$

2.2 Boundaries conditions

The boundaries conditions on air/polystyrene interface are:

$$-\vec{n} \cdot (k \vec{\nabla} T) = h \cdot (T_{ext} - T)$$

where the subscript ext is external and h is the convective heat transfer coefficient

2.3 Initial values and input parameters

Initial temperatures are different for packaging material and fruits. Ice bags are put inside a polystyrene box to preserve their temperature.

Input parameters and initial temperature are listed in Table 2.

	blueberries	air	polystyrene	ice	water
ρ - Density (kg/m ³)	990	1.248	25	917	1000
C_p - Specific heat (J/kg K)	3786	1013	1200	2260	4186
k - Thermal conductivity (W/m K)	0.539	0.024	0.033	2.208	0.6

Table 1: characteristics of materials

Parameters	Value	units
Blueberries initial temperature	302.25	K
Polystyrene initial temperature	295.15	K
Air initial temperature	297.15	K
Ice initial temperature	253.15	K
l _{da} - Latent heat of fusion	333	kJ/kg
h - Convective heat transfer coefficient	8	W/m ² K
T _{ext} - Ambient temperature	300.15	K
Ice fusion temperature	273.15	K
Percentage of blueberries in mixed slab	75 %	

Table 2: initial temperatures and input parameters

3. Methods

Two different type of experiment were performed, the first one in laboratory, on an empty Icepack, to study the passive refrigerator system in a controlled environment, the other one on field, to carry out operators manually harvest and the following trip to the collecting centre.

Laboratory experiments were performed using T-thermocouples to monitor the temperature inside the Icepack in 5 different point: they were all put to detect the defrosting time of the ice slab. Icepack rests at monitored ambient temperature 20 hours on a table with inside the charge of ice.

On field experiments were performed with 5 stand alone temperature data logger, put under the ice slab, under the cover of the Icepack, inside the plastic case with blueberries at three different height: top, bottom and in the middle. Ice slab at 253.15K was put inside an Icepack in the collecting center, after about 30 minutes trip, on field, Icepack was filled with 8 plastic cases with manually harvesting fruits and then about 2 hours trip to return to laboratory, where the box rests 15 hours.

4. Numerical Model

Three different numerical model was performed with COMSOL Multiphysics® (ver 3.5a and 4.2a):

- a 3D model of the empty Icepack to simulate the passive refrigerator system. The partial differential equations for heat transfer were solved using the *Heat Transfer module*, with a free time step by the solver MUMPS. The cooling simulation is 20 hours with a collecting time of 60 seconds. The mesh is automatically created with a normal refinement and is formed by 34568 elements.
- a 3D symmetrical model of the Icepack filled with a 5 cm height slab with apparent thermal characteristics obtained from air and fruit. The partial differential equations for heat transfer were solved using the *Heat Transfer module*, with a free time step by the solver GMRES. The cooling simulation is 15 hours with a collecting time of 60 seconds. The mesh is automatically created with a normal refinement and it is formed by 14398 elements
- a 3D symmetrical model of icepack filled with a randomize dispersion of fruits, created with a original Matlab® script and then imported in COMSOL Multiphysics®. The partial differential equations for heat transfer were solved using the *Heat Transfer module*, with a free time step by the solver GMRES. The cooling simulation is 15 hours with a collecting time of 60 seconds. The mesh is automatically created with a normal refinement and it is formed by 87271 elements

4.1 Geometry

The geometry of the first model consist of 3 blocks put in the right position, that describe the Icepack system, the air inside the icepack and the ice slab. All the real geometry was drawn.

The second geometry consist of 4 blocks put in the right position. These blocks describe the Icepack system, the air, the slab of blueberries and the ice. Only a quarter of the real geometry was drawn because of the symmetry of the system.

The third geometry is created like the first one, but the fruits are simulated and imported from Matlab®. The original script consist in a randomized Gaussian distribution diameter of the fruits (sphere) experimentally determined. It is hypothesized that the set sizes of the plastic case, that contains blueberries is the resulting of the intersection of 5 sphere with infinite diameter. Each fruit have to touch three points of the geometry to be in equilibrium. The sphere that must be positioning will be placed in the point with less absolute potential energy. No overlapping between spheres is allowed. The loop ends when all the spheres have been positioned. Also in this case only a quarter of the real geometry was drawn because of the symmetry of the system. The sequence of randomized

distribution of fruits was repeated two times because in a quarter of Icepack there are 2 plastic cases.

5. Results and discussions

The model of the empty Icepack was focused on the melting time of the ice slab. After a fast decrease of the inside temperature from ambient temperature due to the insertion of the ice slab in the box, there is an increase until it reaches the fusion temperature of the ice, with a constant value of about 273.15. The total thawing time of the ice slab is after 15.8 hours, and then the temperature rises again. The model gives about 17 hours as thawing time, with a relative percentage error, calculated as

$$e = \frac{|t_{exp} - t_{mod}| * 100}{t_{exp}}$$

where the subscript exp is experimental and mod modeled, equal to 7.6%.

Figure 1 is the graph of compared temperatures (modeled and experimental) of the ice slab.

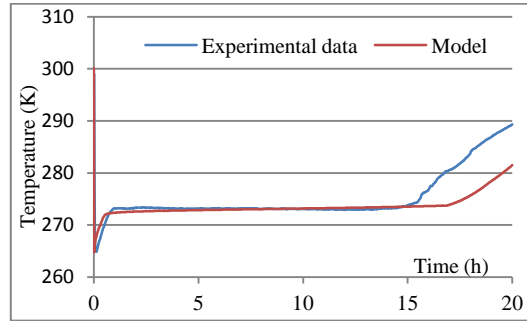


Figure 1: temperature of ice slab of empty Icepack

The model with the mixed air/blueberries slab was focused on thawing time of the ice slab and on the temperature in the warmer point inside the blueberries mass (the sensor in the middle). There is a quickly decrease of the measured temperature of the ice, followed by an increase until a plateau is reached at melting temperature of the ice. Total melting is about after 10.6 hours from the filling of the Icepack. The measured temperature between the blueberries presents a decreasing till about 283 K and after a slow increasing. The model simulate the total thawing of the ice at about 9.7 hours, with a relative percentage error (e) equal to 8.5%. The quality of the simulation is given by the mean relative error, which is defined as:

$$em(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|T_{exp} - T_{mod}|}{T_{exp}} \right)_i$$

where n is the number of experimental observations. The calculated em of the central probe is 1.06%. Figure 2 shows the graph of temperatures (modeled and experimental) of the ice slab and of the blueberries

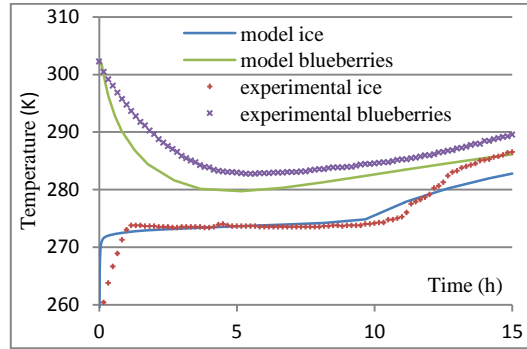


Figure 2: temperature profiles of ice and blueberries in the slab model

The model simulating fruits with sphere was focused on melting time of the ice slab and on the temperature distribution inside the blueberries mass, improving the slab model results.

The simulated melting time is very close to the real thawing time, with a relative percentage error close to 0. The mean relative error (em) of the central probe (blueberries mass) is 0.43%, about half of the error from the slab model. Figure 3 shows the temperature profiles of simulated fruits model and experimental data

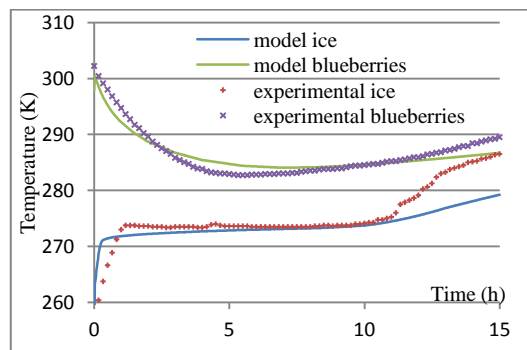


Figure 3: temperature profiles of ice and blueberries in the simulated fruits model

6. Conclusions

The finite element models were developed to investigate the temperature profile inside the Icepack and the cooling of blueberries from immediately after harvest to 15 hours later. The models predictions were validated with experimental measurements.

Future improvement of this models is under way, which will deal with the optimization of the geometry of the Icepack. The time from the harvest on field to the collecting center with the refrigerated rooms is about 6 hours, so it is possible to reduce the weight of the packaging reducing the ice slab height. Stackability of Icepack is also studied, to improve melting time of ice slab.

7. Acknowledgements

The authors thank Dr. Valentina Giovenzana and Dr. Roberto Beghi for their contribution to this study.

Bibliografia

1. AMEUR, A. L., MATHIEU, O., LALANNE, V., TRYSTRAM, G., BIRLOUEZ-ARAGON, I., 2007. Comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperature. *Food chemistry* **101**, 1424-1433.
2. BAIK, O.D., GRABOWSKI, S., TRIGUI, M., MARCOTTE, M. CASTAIGNE, F., 1999. Heat transfer coefficient on cakes baked in a tunnel type industrial oven. *Journal of Food Science*, **64**, No. 4 688-694
3. BARBANTI, MORA, FERRARINI, TORNIELLI, CIPRIANI, 2008. Effect of various thermo-hygrometric conditions on the withering kinetics of grapes used for the production of “Amarone” and “Recioto” wines. *Journal of food engineering*, 85, 350-358
4. BIKARD, J., COUPEZ, T., DELLA VALLE, G., VERGNES, B., 2012 Simulation of bread making process using a direct 3D numerical method at microscale:analysis of baking step. *Int J Mater Form*, **5**, 11-24
5. CHEVALLIER, S., DELLA VALLE, G., COLONNA, P., BROYART, B., TRYSTRAM, G., 2002. Structural and chemical modifications of short dough during baking. *Journal of cereal science* **35**, 1-10
6. CRANK, J., 1975. The mathematic of diffusion (2nd edition). Oxford, UK: Oxford University Press
7. EYMARD, R., GALLOUET, T., HERBIN, R., 1997. Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, Lions eds, **7**, 713-1020
8. FABBRI A., CEVOLI C., SILAGHI F.A., GUARNIERI A., 2011. Numerical simulation of physical systems in agri-food engineering. *J of Agricultural Engineering* vol XLII n° 4, 1-7
9. FAHLOUL, D., TRYSTRAM, G., DUQUENOY, A. BARBOTTEAU, I. 1994. Modeling heat and mass transfer in band oven biscuit baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **27**, 119-124
10. FERRARI E., MARAI S., GUIDETTI R., PIAZZA, L., 2012. Modelling of heat and moisture transfer phenomena during dry biscuit baking by using finite element method. *International Journal of Food Engineering*. Volume 8, Issue 3, Pages –, ISSN (Online) 1556-3758
11. FEYISSA, A.H., GERNAEY, K.V., ASHOKKUMAR, S., ADLER-NISSEN, J., 2011. Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of food engineering*, **106**, 228-235
12. GUIDETTI, R., 2005. L'analisi energetica come indicatore di processo nel settore enologico. *L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea* / G. Blandini, G. Manetto: GeoGeografica, 2005 Jun. - ISBN 88-901860-0-3. convegno L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea tenutosi a Catania nel 2005

13. JEFFERSON D.R., LACEY A.A., SADD P.A., 2007. Crust density in bread baking: mathematical modeling and numerical solutions. *Applied mathematical modeling* 31, 209-225
14. MARAI S., FERRARI E., CIVELLI R., 2012. Post harvest cold chain optimization of little fruits. *COMSOL CONFERENCE: user presentation and proceedings cd*. ISBN:978-0-9839688-7-0.
15. MIRADE, P. S., DAUDIN, J., D., DUCEPT, F., TRYSTRAM, G., CLEMENT, J., 2004. Characterization and CFD modelling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven. *Food research international*, **37**, 1031-1039
16. MUNDT, S., WEDZISCHA, L., B., 2007 A kinetic model for browning in the baking of biscuits: effects of water activity and temperature. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **40**, 1078-1082.
17. V NICOLAS, P SALAGNAC, P GLOUANNEC, J-P PLOTEAU, V JURYc, L BOILLEREAUX, 2012. Modelling heat and mass transfer in bread baking with mechanical deformation. *Journal of Physics: Conference Series* **395**
18. OZILGEN, M., HEIL, J.R. 1994 Mathematical modeling of transient heat and mass transport in a baking biscuit. *Journal of food processing and preservation* **18**, 133-148
19. PURLIS, E. 2011. Bread baking: technological consideration based on process modelling and simulation. *Journal of food engineering*, **103**, 92-102
20. PURLIS, E., SALVADORI, V.O., 2009. Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling. *Journal of food engineering*. **91**, 428-433.
21. PURLIS, E., SALVADORI, V.O., 2009. Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of food engineering*. **91**, 434-442.
22. SABLANI, S.S., MARCOTTE, M., BAIK, O.D., CASTAIGNE, F. 1998. Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. Review article. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **31**, 201-209
23. SAKIN, M., KAYMAK-ERTEKIN, F., ILICALI, C., 2007(a). Modeling the moisture transfer during baking of white cake. *Journal of food engineering* 80, 822-831
24. SAKIN, M., KAYMAK-ERTEKIN, F., ILICALI, C. 2007 (b). Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking. *Journal of food engineering*, **83**, 463-474
25. SAVOYE, I., TRYSTRAM, G., DUQUENOY, A., BRUNET, P., MARCHIN, F. 1992. Heat and mass transfer dynamic modelling of an indirect biscuit baking tunnel-oven. Part I: modelling principles. *Journal of food engineering*, **16**, 173-196
26. SCHIBUKAWA, S., SUGIYAMA, K., YANO, T. 1989 Effects of heat transfer by radiation and convection on browning of cookies at baking. *Journal of Food Science*, **54**, No. 3, 621-624, 699.
27. SENADEERA, W., BHANDARI, B. R., YOUNG, G., WIJESINGHE, B., 2003. Influence of shaped of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of food engineering* **58**, 277-283
28. THORVALDSSON, K., JANESTAD, H., 1999. A model of simultaneous heat, water and vapour diffusion. *Journal of food engineering*, **40**, 167-172

29. THORVALDSSON, K., SKJOLDEBRAND, C., 1998. Water diffusion in bread during baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **31**, 658-663
30. VANIN, F.M., LUCAS, T., TRYSTRAM, G., 2009. Crust formation and its role during bread baking. *Trends in food science and technology* 20, 333-343
31. ZHOU, W., THERDTHAI, N., 2007. Three dimensional CFD modelling of a continuous industrial baking process. In *Computation fluid dynamics in food processing*, (Da-Wen Sun eds.) pp 287-312, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton